

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA



**MÁSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO 2014-2015**

Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes
aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de
estos a la agricultura de precisión.

Díaz García-Cervigón, Juan José

Junio 2015

Tutor/a: **García Rodríguez, María Del Pilar.**
Gutierrez Puebla, Javier.

Resumen

El presente trabajo pretende mostrar la utilidad de los UAS / RPAS, (Sistemas aéreos no pilotados / sistemas aéreos pilotados remotamente) para realizar trabajos de agricultura de precisión, además de ver la gran utilidad de los sistemas de información geográfica al tratar estas imágenes.

Para ello realizaremos un estudio de diferentes índices de vegetación (NDVI, GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RG), a partir de las imágenes aéreas tomadas con cámaras multiespectrales montadas sobre UAS/RPAS, analizaremos la variabilidad agronómica según diferentes índices de vegetación y realizaremos un estudio estadístico entre estos índices, viendo cuál de estos índices (GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RG) presenta una mayor correlación con el NDVI, haciendo además un análisis de regresión entre estos índices.

Palabras Claves

UAS, RPAS, Agricultura de precisión, Índices de vegetación, NDVI, GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RG, sistemas de información geográfica, cámaras multiespectrales, variabilidad agronómica

Abstract

This paper aims to show the usefulness of UAS / RPAS (Unmanned Aerial System / Remotely Piloted Aerial Systems) to work in precision agriculture, in addition to seeing the usefulness of geographic information systems to address these images. To do carry out a study of different vegetation indices (NDVI, GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RG), from aerial images taken with cameras mounted multiespectrasles UAS / RPAS, we agronomic variability under different vegetation indices and. We carry out a statistical study of these indices, seeing which of these indices (GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, R/G) has a higher correlation with NDVI also doing a regression analysis between these indices.

Keywords

UAS, RPAS, Agriculture of precision, Indexes of vegetation, NDVI, GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RG, geographical information systems, multiespectrasles cameras, agronomic changeability

INDICE:

01 - INTRODUCCIÓN.....	07
02 - ESTADO DEL ARTE.....	10
02.01-UAS/RPAS.....	10
Aparatos con ala rotatoria.....	12
Aparatos con ala fija.....	13
02.02-SENSORES.....	14
Multiespectral.....	14
Hiperespectral.....	15
Térmico.....	15
02.03-ESPACIO ÁEREO-ÁMBITO LEGISLATIVO.....	16
02.04-CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES IMÁGENE.....	19
02.05-APLICACIONES UAS/RPAS.....	21
02.06-IMÁGENES PROCEDENTES DE UAS Y SUS VENTAJAS.....	22
02.07-AGRICULTURA DE PRECISION.....	25
02.08-APLICACIONES CONCRETAS AGRICULTURA PRECISION..	26
03 - OBJETIVOS.....	29
04 - LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO.....	31
05 - MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	35
05.01-Materiales.....	35
05.02-Metodología.....	38
05.03-Esquema de procesos.....	41
05.04 - Índices de vegetación y puntos de muestreo.....	42
05.04.01- NDVI.....	42
05.04.02- GNDVI.....	43
05.04.03- RVI.....	44
05.04.04- GVI.....	44
05.04.05- NGRDI.....	44
05.04.06- RG.....	45

05.04.07- Puntos de muestro y buffer.....	45
06 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
06.01-Indices vegetación (Escenario 1).....	47
06.01.01. Mapa de Reflectancia.....	47
06.01.02. Índices Brutos.....	49
06.01.03. Índices Brutos solo en zonas donde NDVI>0.2.....	49
06.01.04. Valores definitivos de los índices.....	50
06.02-Mapas de índices de vegetación (Escenario1).....	51
06.03-Zonificación índices vegetación análisis clúster (Escenario 2).....	53
06.04-Mapa zonificación índices vegetación análisis clúster (Escenario 2).....	54
06.05-Análisis estadístico.....	56
06.06-Resultados análisis estadístico.....	60
06.06.01 Análisis de correlación.....	60
06.06.02 Análisis de regresión.....	64
07 - CONCLUSIONES.....	67
REFERENCIA Y BIBLIOGRAFIA.....	69
ANEJOS.....	71

INDICES DE FIGURAS

<i>Figura 01 Segmento Vuelo y Segmento tierra.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 02 Clasificacion Aeronaves.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 03.UAS Ala rotatoria.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 04.UAS Ala Fija.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 05 Sensores.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 06. Localización.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 07. Área de estudio sobre Puertollano.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 08. Vista parcial de la finca de estudio.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 09. Área de estudio.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10 .Especificaciones técnicas y equipo.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 11.Camara Multiespectral Tetracam ADC.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 12.Plan de vuelo.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 13.UAS/RPAS con Cámara Multiespectral Tetracam ADC Lite.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14.Procesado de imágenes.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15.Eschema de procesos.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 16.Eschema puntos de muestreo.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 17. Distribución de puntos de muestreo y Buffer de Puntos de muestreo.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 18. Mapa de reflectancia.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 19. RVI a partir de Valores de Reflectancia.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 20. Zonas con NDVI > 0.2.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21. RVI Definitivo.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 22. Indices de vegetación.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 23. Zonificación RVI</i>	<i>53</i>
<i>Figura 24. Zonificación de Índices de vegetación.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 25. Curvas de regresión Escenario 1.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 26. Curvas de regresión Escenario 2.....</i>	<i>62</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 01. Diferencia entre ala Fija y Multirrotor.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 02. Bandas espectrales de sensores.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 03. .Características del sensor.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 04. Resoluciones según altura.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 05. Tipos de Correlación en función del valor σ.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 06. Bondad del ajuste en función del valor σ^2.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 07. Coeficientes de correlación y determinación.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 08. Coeficientes de correlación y determinación.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 09. Coeficientes de correlación y determinación.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 10. Regresión de Índices de vegetación.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 11. Regresión clúster Índices de vegetación.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 12. Regresión de Índices de vegetación simplificado.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 13. Regresión Cluster de vegetación simplificado.....</i>	<i>66</i>

01. INTRODUCCIÓN:

El empleo de la teledetección, cada vez más extendido para el análisis y gestión de los recursos naturales, se encuentra condicionado por las limitaciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes disponibles. La llegada al mundo civil de los vehículos aéreos no tripulados, conocidos por las siglas UAS (Unmanned Aerial System) o RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), junto con los avances en el desarrollo de microsensores, posibilita un nuevo concepto de Teledetección de Alta Resolución donde se pueden superar ciertas limitaciones en los tres niveles de resolución (espacial, espectral y temporal), siendo además una solución económicamente viable en superficies de cierto tamaño.

Los vehículos aéreos no tripulados (UAS/RPAS), se han desarrollado en los últimos años como una nueva plataforma tremendamente versátil para la adquisición de imágenes remotas con multitud de aplicaciones en cartografía, termografía y Agricultura de Precisión.

En el año 2013 se llevó a cabo el estudio “El impacto económico de la integración del sistema aeroespacial no tripulado en la economía de los EE.UU”. Este estudio recoge que entre los múltiples usos de los UAS/RPAS en el sistema aeroespacial de EE.UU. los mercados civiles más prometedores son la agricultura de precisión y la seguridad pública, representando entre los dos el 90% de los mercados potenciales conocidos para los UAS/RPAS.

Agricultura de precisión es un concepto agronómico, que consiste en el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento de la variabilidad existente en una explotación agrícola. Según Fountas et al. (2003), la agricultura de precisión se define como el “manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel de subparcela de campo, para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental”. Para caracterizar esta variabilidad se utilizan herramientas tecnológicas como los Sistemas de Posicionamiento Global, conocidos popularmente como GPS, sensores planta-clima-suelo e imágenes multiespectrales obtenidas a partir de satélites, aviones o UAS/RPAS.

Los datos captados por todos estos sensores se almacenan digitalmente en forma de tablas y mapas, a partir de los cuales se genera la información que ayuda al agricultor en la toma de decisiones en campo (fertilización, podas o aclareos).

El objetivo último y más importante de la agricultura de precisión es la obtención de mayores rendimientos económicos, medioambientales y sociales, aumentando la competitividad a través de una mayor eficacia en las prácticas agrícolas.

López-Granados (2013) describe cómo se han usado vehículos aéreos no tripulados en la evolución de la producción agraria. Se trata de varios trabajos sobre tres de los principales problemas que pueden afectar al rendimiento de los cultivos en diferentes escenarios agrícolas:

- ✓ *La detección de áreas infestadas por malas hierbas en cultivos herbáceos.*
- ✓ *La detección de zonas que necesitan mayor o menor riego en frutales.*
- ✓ *La detección de zonas infectadas por hongos en olivar.*

Por otro lado el Investigador y director del programa nacional de agricultura de precisión del INIA e ingeniero agrónomo Stanley Best (2014), indica que el uso de drones (vehículos aéreos no tripulados) en la agricultura es una práctica cada vez más común, y que los buenos resultados en términos de eficiencia son confirmados por los agricultores, como también por investigadores. Stanley Best reconoce su ayuda para la maximización de rendimientos, ya que a diferencia del agricultor que debe desplazarse por el campo, buscando “a ojo” las deficiencias que puedan existir en el cultivo, el dron vuela sobre el campo y logra recabar información sobre el estado de los cultivos, con mayor precisión, gracias a la captura aérea de fotografías termales y multiespectrales. Según Best, “el productor necesita tener información certera para tomar medidas, y hoy, la tecnología nos permite decirle al productor qué tiene que hacer y cómo, de manera eficiente”.

Además, Pilar Barreiro y Constantino Valero (2014), hacen referencia a las ventajas que pueden aportar los drones como herramienta que caracterice los campos (debido a que las variables biológicas y físicas generalmente no se encuentran uniformemente distribuidas), en el control variable de Insumos.

Berni et al (2009), considera que los UAS/RPAS vienen a cubrir las limitaciones que tienen actualmente el uso de satélites y aviones en el manejo de cultivos en tiempo real, como son la falta de imágenes con resolución espacial y espectral óptimas y una mejora de la capacidad de revisita necesaria para detectar determinados problemas que afectan al desarrollo de los cultivos.

- ✓ Manejo eficiente del agua.
- ✓ Tratamiento localizado de herbicidas.
- ✓ Uso óptimo de fertilizantes.
- ✓ Conteo de planta.
- ✓ Supervisión de áreas fumigadas.
- ✓ Detección temprana de plagas y enfermedades en cultivos.

Sin embargo, y contrario a estos autores, Salomón Montesinos (2012-2013), nos indica carencias que tienen los UAS/RPAS respecto a otras plataformas aéreas (satélites o aviones tripulados). Principalmente haciendo referencia a la menor utilidad de los drones en la adquisición de datos en grandes superficies de plantaciones (olivares o viñedos) debido a que para estas superficies, es más útil adquirir las imágenes aéreas procedentes de los satélites, ya que en una sola imagen recubrimos una superficie de 100 Km².

Otra de las desventajas de los drones respecto a imágenes satelitales es la menor capacidad respecto a su resolución espectral, teniendo menores resoluciones espectrales las cámaras con las que están trabajando los drones respecto a las utilizadas en los satélites.

Montesinos (2012-2013), lo que nos quiere dejar claro principalmente es que los UAS/RPAS transportan sensores cuya potencialidad en agricultura a la hora de captar datos, viene dada por la precisión espacial y disponibilidad temporal de ese dato, debido fundamentalmente a las características de las cámaras utilizadas, a la altura de vuelo, y mayor capacidad temporal de adquisición de datos respecto a satélites y aviones. Pero las aplicaciones operativas que utilizan los agricultores se basan en la integración de diferentes sensores que caracterizan la variabilidad espacial, como la variabilidad temporal de las fincas.

Montesinos (2012-2013) discrepa de afirmaciones o expresiones fáciles de encontrar como: «los UAS son capaces de detectar el estrés nutricional en los cultivos, lo que facilita el uso óptimo de fertilizantes sólo en las zonas en las que es necesaria su aplicación, y también son capaces de realizar una detección temprana de enfermedades y plagas». Debido a que, los UAS son solamente las plataformas sobre las que se instalan las cámaras y los sensores multiespectrales que nos permiten obtener datos de una explotación. No son el único tipo de plataforma, ya que estos sensores multiespectrales pueden estar instalados en satélites y en aviones; tampoco son la única fuente de datos, porque también podemos obtener la información que necesitamos para la toma de decisiones, por ejemplo, a partir de sensores planta-clima-suelo que se instalan directamente en campo.

Según Montesinos las aplicaciones operativas que tienen los drones, considerándose estas como aplicaciones que resuelven problemas reales y a un costo razonable dependen:

- ✓ Del valor añadido del cultivo. En España viña y olivo son los que más aplican estas técnicas.
- ✓ De que la variabilidad influya en la producción/calidad final del producto.
- ✓ De que se pueda caracterizar la variabilidad (suelos/Litología, Morfología y desarrollo vegetativo).
- ✓ De que la información obtenida permita la mejora del manejo del cultivo y de su productividad.

02. ESTADO DEL ARTE:

02.01-UAS/RPAS:

UAS/RPAS es una aeronave sin tripulación a bordo, con unas características técnicas excepcionales para realizar vuelos, controlada remotamente por un piloto mediante un sistema de control. Estos tienen dos segmentos claramente definidos:

- ✓ Segmento de Vuelo: Formado por el Vehículo Aéreo y los sistemas de Recuperación (aterrizaje sobre ruedas o patines, red, cable, paracaídas...).
- ✓ Segmento de Tierra: Formado por la Estación de Control (está en tierra y, recibe la información enviada por los drones y a su vez les dan órdenes) y los sistemas Lanzador (pueden ser hidráulicos, neumáticos, etc.).

La observación aérea mediante UAS/RPAS conlleva la formación de cuatro conjuntos, necesarios para hacer posible la recogida de datos, repartidos entre la plataforma aérea y la estación terrestre.

- ✓ Plataforma de Vuelo: el propio vehículo y su carga, es decir, la cámara fotográfica y otros sensores.
- ✓ Sistema de Control de Vuelo: Formado por receptores GPS+EGNOS integrados en la plataforma de vuelo. Georreferencia la información obtenida y controla el seguimiento del vehículo aéreo.
- ✓ Sistema de Lanzamiento y Recuperación: controla el despegue y el aterrizaje.
- ✓ Sistema de Comunicaciones: a través de la radio, comunica la estación de control con el UAS
- ✓ , transmite la información adquirida durante el vuelo.



Figura 01 Segmento Vuelo y Segmento tierra

Las aeronaves se pueden clasificar según diferentes criterios, es frecuente utilizar una clasificación atendiendo a la forma en la que las aeronaves consiguen su sustentación en la atmosfera.



Figura 02 Clasificación Aeronaves

De manera general, existen dos tipos de plataforma de UAS/RPAS, de ala fija y de ala rotatoria. En función del objetivo buscado, será necesario el empleo de una plataforma u otra.

Los condicionantes principales para seleccionar la plataforma serán la superficie a estudiar, la resolución espacial requerida y las condiciones para el despegue y el aterrizaje en la zona.

02.01.01-Ala Rotatoria:

Los aparatos con ala rotatoria son aquellos en los cuales, las fuerzas de sustentación se logran mediante el giro de las hélices en el aire, siendo estos aparatos también conocidos como multirrotores o helicópteros, las características más importantes de estos son:

- ✓ Despegue y aterrizaje vertical, reduciendo las necesidades de espacio para las maniobras de aterrizaje y despegue.
- ✓ Posibilidad de volar a puntos fijos Vuelo estacionario, muy útil para aplicaciones de inspección.
- ✓ Mayor maniobrabilidad y precisión de vuelo, ya que los sistemas de ala fija siguen trayectorias curvilíneas, con radios de giro relativamente grandes y velocidades de ascenso y descenso bastantes estrictas, sin embargo los multirrotores pueden volar siguiendo cualquier trayectoria en las tres dimensiones.
- ✓ El diseño de los multirrotores permite embarcar cargas de pago más voluminosas.



Figura 03.UAS. Ala rotatoria

02.01.02-Aparatos con ala fija:

Los aparatos de ala fija, son los considerados como aviones, y sus principales características son:

- ✓ Son más eficientes que los multirrotores, ya que a igualdad de tamaño, tienen mayor autonomía.
- ✓ Vuelan a mayor velocidad, por lo que al tener además mayor autonomía recubren más superficie, siendo más útiles en tareas de cartografía o teledetección.
- ✓ Tienen menor huella sonora, siendo más indicados para operaciones de vigilancia.
- ✓ Tienen mayor rango meteorológico, en términos de temperatura, viento y lluvia.



Figura 04.UAS. Ala Fija

CARACTERÍSTICA	ALA FIJA	MULTIRROTOR
Peso total	3,5 kg	3,5 kg
Carga de pago	1,0 kg	1,0 kg
Autonomía	2 h	40 min
Propulsión	Eléctrica	Eléctrica
Velocidad	50 km/h	40 km/h
Despegue	Catapulta	Vertical
Aterrizaje	En panza o paracaídas	Vertical
Máximo viento	15 m/s	10 m/s

Tabla 01.Diferencia entre ala Fija y Multirrotor

02.02-SENSORES:

En los últimos años se ha producido un gran avance en el desarrollo de nuevos sensores de imagen de alta resolución, promovido especialmente por la electrónica de consumo. También, gracias al desarrollo de sensores de imagen térmica, actualmente existen en el mercado cámaras térmicas comerciales sin necesidad de refrigeración a precios asequibles para ciertas aplicaciones. De igual modo, se ha conseguido desarrollar sensores multiespectrales e hiperspectrales miniaturizados que pueden ser embarcados en UAS/RPAS.

Como consecuencia, varios autores han publicado trabajos en los que usando este tipo de cámaras en pequeños aviones o helicópteros similares a los usados en radio control, han demostrado su viabilidad como plataformas para la adquisición de imágenes (Ambrosia et al., 2003; Esposito, 2007; Haitao & Lei, 2007; Lambers et al., 2007; Sugiura et al., 2005; Zhao et al., 2006).

SENSOR	BANDA ESPECTRAL
Visible –RGB (Cámara Fotográfica)	380-780 Nanómetros
Visible (Cámara de Video)	380-780 Nanómetros
Infrarrojo cercano	3 Bandas 500-950 Nanómetros
Multiespectral	18 Bandas 500-950 Nanómetros
Hiperspectral	400 Bandas 450-950 Nanómetros
Térmico	8-12 Micrómetros

Tabla 02. Bandas espectrales de sensores

Sensor multiespectral.

Existen sensores multiespectrales miniaturizados para embarcar en vehículos aéreos no tripulados. Estos sensores pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas espectrales, siendo posible seleccionar diferentes bandas mediante el empleo de filtros. Por regla general, estos sensores están diseñados para el estudio de parámetros relativos a la vegetación, por lo que las bandas están seleccionadas en los rangos del verde, rojo e infrarrojo cercano, donde la vegetación presenta su mayor respuesta de absorbancia y reflectancia.

El proceso para la toma de las imágenes es similar al vuelo fotogramétrico, en cuanto a los aspectos relativos a la posterior corrección geométrica de las imágenes y generación de mosaicos. Además, el tratamiento de estas imágenes no solo precisa de corrección geométrica, sino que son necesarias operaciones de calibración radiométrica, así como las correcciones atmosféricas necesarias para la obtención de datos validados de reflectancia y temperatura de superficie.

Sensor hiperespectral.

Es el sensor más avanzado en la toma de datos espectrales. En los últimos años se han desarrollado sensores con un peso inferior a 1 kg, lo cual ha permitido su empleo mediante UAS.

La mayoría de las soluciones existentes capturan la información comprendida entre 400 nm y 1.000 nm, tomando datos de hasta 300 bandas. Con ello, se consigue la máxima información espectral en el rango correspondiente a la vegetación.

Al igual que en el sensor multispectral, es precisa la corrección geométrica, calibración radiométrica y corrección atmosférica.

Como resultado, se obtiene el denominado “cubo hiperespectral”, donde cada píxel de la imagen cuenta con tantos datos como bandas se han recogido. En el caso óptimo, cada píxel cuenta con 300 valores correspondientes a las bandas de 2 nm de ancho en el rango (400 – 1000) nm.

Sensor térmico.

La solución pasa por la integración de un núcleo de sensor térmico, cuyo peso puede ser inferior a los 100 g, en un UAS. Dicha integración consiste en la captura de las imágenes tomadas por el núcleo, para su almacenamiento junto con los datos de telemetría del UAS, de manera que pueda procederse posteriormente a su corrección geométrica y formar el mosaico.

De igual modo, es necesaria la calibración radiométrica y corrección atmosférica. El sensor térmico captura la información correspondiente al infrarrojo lejano, en el rango de 8-14 μm , donde se observa la temperatura emitida por los elementos presentes en el área de estudio.

Esta información puede advertir sobre situaciones de estrés hídrico en las plantas, permitiendo detectar ciertos problemas fitosanitarios, y facilita la detección de otro tipo de situaciones de interés a nivel forestal, tales como localización de fauna, detección de vertidos en cauces, etc.



Figura 05 Sensores

02.03-ESPACIO ÁEREO-ÁMBITO LEGISLATIVO:

En la Unión Europea, a nivel legal, hay dos grandes grupos de UAS, cada uno de los cuales regulados por diferentes autoridades:

- ✓ Los UAS con un peso superior a 150 kg, los cuales se rigen por la normativa de la Agencia Europea de Seguridad Aérea.
- ✓ Los UAS de peso inferior a 150 kg, los cuales están regulados por la autoridades de aviación civil de cada Estado Miembro.

Con motivo de las nuevas necesidades y usos se ha producido un cambio sustancial en cuanto a los pesos y medidas de los UAS, ya que si la mayoría de estos antes eran de un peso superior a 150 kg. y necesitaban una gran pista de despegue/aterrizaje, la tendencia a nivel civil y militar a día de hoy es al uso de aparatos mucho más pequeños y ligeros llegando incluso a la miniaturización principalmente por su versatilidad, economía, y facilidad de manejo por un solo operador.

Se espera que el mapa de ruta para la integración segura de los UAS dentro del espacio aéreo europeo esté hecho a partir de 2016.

En la actualidad, la mayoría de los UAS que se han desarrollado son aparatos muy pequeños y ligeros, los utilizados en agricultura pueden pesar entre 2 y 3 kg. De momento, parece que los UAS de menos de 25 kg, están a salvo de medidas excesivamente restrictivas en cuanto a materia de seguridad aérea, debido a su escaso peligro para la navegación aérea de vuelos tripulados.

A diferencia de EE.UU. en la Unión Europea no se han producido las previsibles reacciones en contra de los UAS, dotados con cámaras y sensores, que podrían afectar la posible invasión a la privacidad de terceros.

Normas para las operaciones de trabajos aéreos

Las operaciones de trabajos técnicos o científicos («trabajos aéreos») están sujetas además a las siguientes condiciones y limitaciones:

- Las aeronaves pilotadas por control remoto cuya masa máxima al despegue no exceda de 25 kg sólo podrán operar en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre, y a una altura sobre el terreno no mayor de 400 pies (120 m).

Estas aeronaves habrán de volar dentro del alcance visual del piloto, a una distancia de éste no mayor de 500 m. Se exceptúan aquéllas cuya masa máxima al despegue sea inferior a 2 kg, que podrán operar más allá del alcance visual del piloto, siempre que se mantengan dentro del alcance de la emisión por radio de la estación de control y que cuenten con medios para poder conocer la posición de la aeronave. Además, la realización de estos vuelos más allá del alcance visual requiere la emisión previa de un NOTAM por el proveedor de servicios de información aeronáutica, a petición del operador, para informar al resto de los usuarios del espacio aéreo de la zona en que vayan a tener lugar.

- El resto de las aeronaves (aquéllas cuya masa máxima al despegue exceda de 25 kg y no sea superior a 150 kg y aquéllas cuya masa máxima de despegue sea igual

o superior a 150 kg destinadas a la realización de actividades de lucha contra incendios o búsqueda y salvamento), podrán operar con las condiciones y limitaciones establecidas en su certificado de aeronavegabilidad emitido por la Agencia estatal de Seguridad Aérea.

Los operadores de «trabajos aéreos» con aeronaves pilotadas por control remoto habrán de cumplir los siguientes 10 requisitos:

1. Disponer de la documentación relativa a la caracterización de las aeronaves que vaya a utilizar, (definición de su configuración, características y prestaciones).
2. Haber elaborado un «*Manual de Operaciones del operador*» que establezca los procedimientos de la operación. Este documento no debe confundirse con el «*Manual de Vuelo*» o documento equivalente de la aeronave, que explica su funcionamiento y da instrucciones para su manejo, incluyendo las situaciones anormales y de emergencia (que puede incluirse dentro del «*Manual de Operaciones*»), sino que debe contener los criterios y procedimientos que va a utilizar el operador para realizar de manera segura los diferentes tipos de operaciones que lleve a cabo.
3. Haber realizado un estudio aeronáutico de seguridad de la operación u operaciones, en el que se constate que la misma puede realizarse con seguridad, que puede ser específico para un área geográfica o tipo de operación determinado, o genérico de manera que abarque un abanico amplio de tipos de operación y/o áreas geográficas. En este segundo caso, el estudio será más complejo, pero evitará el inconveniente del estudio específico de tener que remitir una modificación cada vez que se vaya a realizar una operación o volar en un área geográfica no contemplados en el estudio inicial.
4. Haber realizado con resultado satisfactorio los vuelos de prueba necesarios para demostrar que la operación pretendida puede realizarse con seguridad. Estos vuelos se contemplan en el apartado 4 del artículo 50.
5. Haber establecido un programa de mantenimiento de la aeronave, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.
6. La aeronave esté pilotada por pilotos que cumplan los requisitos establecidos en el apartado 5 del mismo artículo 50.
7. El operador cuente con una póliza de seguro u otra garantía financiera que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños que puedan surgir durante y por causa de la ejecución del vuelo, conforme a la normativa aplicable (Real decreto 37/2001 para las aeronaves de peso inferior a 20 kg de peso máximo al despegue y reglamento (ce) nº 785/2004 del parlamento europeo y del consejo para el resto).
8. Haber adoptado las medidas adecuadas para proteger a la aeronave de actos de interferencia ilícita durante las operaciones (incluyendo la interferencia deliberada del enlace de radio) y establecido los procedimientos necesarios para evitar el acceso de personal no autorizado a la estación de control y al lugar de almacenamiento de la aeronave.
9. Haber adoptado las medidas adicionales necesarias para garantizar la seguridad de la operación y para la protección de las personas y bienes subyacentes

(normalmente serán las medidas de mitigación establecidas en el estudio aeronáutico de seguridad para reducir los riesgos a niveles aceptables, junto con cualquier otra medida que el operador haya decidido adoptar).

10. No volar en ningún caso a menos de 8 km de cualquier aeropuerto o aeródromo, o si se trata de una operación más allá del alcance visual del piloto de una aeronave de menos de 2 kg y el aeropuerto cuenta con procedimientos de vuelo instrumental, a menos de 15 km de su punto de referencia.

02.04-CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LAS IMÁGENES.

Las tres características fundamentales de las imágenes que debemos de tener en cuenta a la hora de realizar un trabajo a partir de fotogramas aéreos son las siguientes:

- Resolución espacial.
- Resolución espectral.
- Frecuencia de cobertura.

La primer medida, resolución espacial, se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen producida por un sensor remoto. Si las imágenes remotas van a ser usadas para identificar y tratar problemas de cultivo en el campo, el productor debe considerar como de afinada debe ser una imagen para que le permita discernir qué es lo que está pasando en el lote. ¿Es necesario distinguir una planta de la otra, un surco del otro, un lote del otro? Hengl (2006) determinó que son necesarios al menos 4 píxeles, para detectar el objeto más pequeño. Por tanto, si por ejemplo el objeto más pequeño en un rodal de malas hierbas de 2m², deberíamos utilizar una imagen con una resolución espacial menor de 0.5.

Las imágenes aéreas procedentes de aviones tripulados convencionales pueden llegar a alcanzar resoluciones submétricas (25 cm) que han permitido mapear las infestaciones de diversas malas hierbas en estado fenológico de floración en cultivos de girasol (De Castro et al., 2012; Peña Barragán et al., 2007 y 2010) o el trigo (López Granados et al., 2006). Sin embargo, las imágenes multispectrales proveniente de satélites de mayor resolución espacial son la de los satélites Geo-Eyes (1.64 m / Pixel) y Quickbird (2.4 m / Pixel).

En el caso de que se requiera mayores resoluciones espaciales para discriminar por ejemplo, las infestaciones de malas hierbas en estado fenológico temprano, es decir cuando presentan entre 2 y 6 pares de hojas, la resolución espacial requerida es mucho mayor (1-6 cm/ pixel) siendo necesario la utilización de UAS para estos objetivos.

De igual manera, la necesidad de una resolución espacial alta también ocurre cuando se trata de cartografiar el estado hídrico de árboles frutales mediante imágenes con rango espectral térmico (8-12 μ m), en los que hay que identificar las coronas puras de un gran número de árboles y separar los píxeles de vegetación de los de suelo desnudo.

Gonzalez-Dugo et al. (2013) revisaron las diferentes plataformas para alcanzar este objetivo y concluyeron que la información térmica junto con una elevada resolución espacial, actualmente solo se consigue mediante la utilización de cámaras instaladas en UAS/RPAS.

La resolución espectral, se refiere a la habilidad de los sistemas de percepción de distinguir y diferenciar entre radiación electromagnética de distintas longitudes de onda, siendo básicamente, número y anchura de las bandas espectrales que pueden discriminar el sensor, a mayor resolución espectral, más útil será la información que pueda ser deducida, en cuanto a resoluciones espectrales podemos distinguir entre imágenes:

- ✓ Multiespectrales: Que generalmente capturan información entre 3 y 7 bandas de unos 100 nm de anchos,
- ✓ Hiperespectrales: Que adquieren información en varias decenas o centenas de bandas estrechas con longitud de ondas inferior a 5 nm de ancho.

En cuanto a la frecuencia de cobertura (a veces llamada resolución temporal), es una medida acerca de cada cuanto tiempo, está disponible un sistema de percepción remota, para recoger información de un punto específico en la tierra. Para la mayoría de los satélites, la frecuencia de cobertura para cualquier sitio particular es igual al ciclo de repetición, o la duración en tiempo que le toma dar la vuelta a la tierra.

02.05-APLICACIONES UAS/RPAS

Dentro de la gran variedad de aplicaciones que se les está dando a los UAS/RPAS, las más generales son las que a continuación detallamos:

- ✓ Topografía aérea: Obtención de ortofotos, modelos digitales del terreno y modelo de elevaciones, obteniendo cartografía, superficies, cubicaciones, mediciones. Actualmente casi todas las constructoras de primer nivel tienen su departamento de UAS/RPAS, para realizar topografía y cartografía, sobre todo en Suramérica y Oriente Medio, debido a que tienen una normativa más benévola que la de nuestro país.
- ✓ Multimedia: Obtención de imágenes y videos aéreos, seguimiento y control de obras, publicidad, eventos. Este tipo de aplicaciones a día de hoy son las que mejor están funcionando debido a que hay una demanda muy extendida por parte de estudios de filmación y fotografía.
- ✓ Agricultura de precisión: Estudio y vigilancia de cultivos, relacionado con plagas, riegos. En este caso solamente se está trabajando en investigación y desarrollo
- ✓ Operaciones Industriales: Inspecciones termografías para la industria realizando chequeos y verificación de Paneles solares, Tendidos eléctrico, Torres de alta tensión, aerogeneradores...etc. REE (Red Eléctrica Española) lleva varios años desarrollando sus propios UAS/RPAS.
- ✓ Edificación: Inspecciones termografías aéreas con el fin de estudiar efecto isla de calor, cubiertas, desarrollos urbanos, patrimonio...etc.
- ✓ Conservación y patrimonio: Realizando catalogación de monumentos históricos, control y evolución del estado de conservación de estos monumentos, además de documentación arqueológica, siendo esta un nicho de mercado que empieza a requerir los servicios de los UAS/RPAS.
- ✓ Gestión forestal: Para detección de incendios, estudios de hidrología y estudios medioambientales, todavía en fase de desarrollo e investigación.

02.06-IMÁGENES PROCEDENTES DE UAS (VENTAJAS/DESVENTAJAS):

En este capítulo pretendemos realizar un estudio de las ventajas y desventajas generales que nos aportan la utilización de estas plataformas, a la hora de realizar la toma de imágenes aéreas:

Además queremos hacer especial mención a las ventajas que sobre todo aporta estos vehículos al agricultor en particular:

Ventajas Generales:

Producción: Incremento de la producción respecto a otros métodos tradicionales de trabajo, ya sea por topografía clásica o fotogrametría.

Bajo coste: Estos sistemas, son mucho más económicos y además ofrecen idénticas prestaciones, que aquellos que emplean aeronaves tripuladas.

Tiempo: Notable reducción en el tiempo empleado para la obtención de datos.

Movilidad: El sistema puede trasladarse y operar con eficiencia en la casi la totalidad del territorio nacional donde se requiera su empleo.

Versatilidad: Este sistema, como medio de obtención de información en tiempo real, puede ser puesto en práctica, para multitud de tareas ya se trate de accidentes, incendios, etc.... Además tiene la gran ventaja de poder volar justo en el momento que se desee, siempre y cuando las condiciones meteorológicas lo permitan, no siendo necesario ordenar con bastante antelación como es en el caso de imágenes procedentes de aviones convencionales.

Durabilidad: Es capaz de permanecer "en observación" durante más de 30 minutos.

Accesibilidad: Debido autonomía que presenta permite la realización de trabajos en zonas de accesibilidad reducida.

Altas resoluciones: Capacidad de volar a poca altura permitiendo capturar imágenes con una gran resolución (Pocos centímetros X pixel).

Reducción de riesgo e impacto ambiental: Al trabajar con aeronaves sin tripulación.

Ventajas para el agricultor:

Al agricultor, poder ver su cosecha desde el aire, le va a ofrecer una perspectiva desconocida hasta ahora, aportándole:

- Patrones que ponen al descubierto todo tipo de incidencias:
 - ✓ Problemas de riego.
 - ✓ Variaciones en el tipo de tierra.
 - ✓ Infestaciones de plagas, malas hierbas, que no se ven a nivel del suelo.
- Imágenes multiespectrales, capturando datos del espectro infrarrojo además del visual, que se pueden combinar para crear una imagen de la cosecha que destaca las diferencias entre las plantas sanas y enfermas que el ojo humano no ve.
- Información semanal, diaria e incluso horaria. cuya combinación de estas imágenes, nos permitirá crear una serie temporal, permitiendo observar los cambios en la cosecha, revelando áreas problemáticas y las oportunidades que hay para gestionar mejor la cosecha.

Gonzalez-Dugo et al. (2013), ha realizado estudios acerca de las ventajas que puede aportar la toma de imágenes térmicas mediante los RPAS.

Por otro lado, en el estudio de malas hierbas en estado fenológico temprano de floración, en cultivos de girasol (De Castro et al., 2012; Peña Barragán et al., 2007 y 2010) o el cultivo de trigo (López Granados et al., 2006), han sacado conclusiones muy favorables acerca de las ayudas que prestan estos aparatos en la toma de imágenes aéreas.

Desventajas Generales:

- ✓ Imposibilidad de trabajar en condiciones meteorológicas desfavorables:
 - Vientos superiores a 30m/sg.
 - Lluvia o nieve.
- ✓ Imposibilidad de realizar vuelos en zonas urbana o con proximidad de población.
- ✓ Imposibilidad de realizar vuelos nocturnos.
- ✓ Poca autonomía de los UAS/RPAS.
 - UAS/RPAS Multirrotores: 15-20 minutos.
 - UAS/RPAS Ala fija: 45 minutos.
- ✓ Superficie recubierta en los vuelos mediante estas plataformas, son menores que los que se pueden obtener a partir de teledetección o aviones tripulados.
- ✓ Características de los sensores montados sobre UAS/RPAS, siendo estos siempre de menores resoluciones espectrales.
- ✓ Riesgos a la hora de realizar las operaciones debido a falta de cobertura por parte de las compañías de seguros, cubriendo solo mediante un seguro a terceros a estas plataformas.
- ✓ Falta de adecuación de una normativa clara, estando actualmente una normativa en vigencia temporal.

Salomón Montesinos Aranda (2012-2013) hace referencia en la necesidad de complementar la utilización de estos aparatos integrándolos junto con otros tipos de sensores, debido a las limitaciones que pueden tener los RPAS, sobre todo en lo relacionado con capacidad de cubrir grandes superficies, que al fin y al cabo son las clientes potenciales en cuanto a demanda de agricultura de precisión.

Montesinos comenta acerca los inconvenientes que los UAS/RPAS, sobre todo desde el punto de vista del cliente final que es el agricultor, debido a que este:

- ✓ No entiende de costes de adquisición o de operación, el coste económico total al aplicar estas técnicas debe de estar en torno a coste del tratamiento fitosanitario, es decir los beneficios que le debe de generar en temas de ahorro de fertilizantes han de ser mayores que los gastos que le supongan el utilizar esta tecnología, por muy novedosa que sea.
- ✓ Quiere respuestas a sus necesidades, le es indiferente que las imágenes tengan una resolución milimétrica, si a él le basta con resoluciones cuasi-métricas. Por otro lado, también hay que tener en cuenta los problemas los UAS/RPAS, a la hora de tener una normativa clara.

02.07-AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

INTRODUCCIÓN.

Los vehículos aéreos no tripulados (UAS/RPAS), se han desarrollado en los últimos años como una nueva plataforma tremendamente versátil para la adquisición de imágenes remotas con multitud de aplicaciones en Agricultura de Precisión. Este sistema agrícola persigue utilizar los inputs (ej.: herbicidas, fertilizantes, riego) en el sitio y momento adecuados.

DEFINICIÓN.

La agricultura de precisión es el manejo diferenciado de los cultivos utilizando para ello diferentes herramientas tecnológicas (GPS, Sensores planta-clima-suelo e imágenes multispectrales provenientes tanto de satélites como de UAS/RPAS), a partir de este manejo diferenciado del cultivo podremos detectar la variabilidad que tiene una determinada explotación agrícola, así como realizar una gestión integral de dicha explotación.

En términos generales se puede considerar que la gestión localizada de un cultivo está definida por un ciclo de cuatro fases:

- 1) **Monitorización**, es decir, detección y mapeo de las variables que interesan en cada momento (ej.: Infestaciones de las malas hierbas o presencia de zonas infectadas por hongos);
- 2) **Toma de decisiones** y elaboración del mapa de tratamientos en función del mapa obtenido de la variable de interés (fase denominada también **planificación de la actuación**: que aplicar, como, cuando y donde);
- 3) **Actuación** en campo o ejecución del manejo localizado que se ha decidido;
- 4) **Evaluación** de la rentabilidad (económica y medioambiental) de las operaciones realizadas en el cultivo para programar acciones el año siguiente.

La finalidad de todo esto es la obtención de mayores rendimientos (económicos, medioambientales, sociales...etc.).

02.08-APLICACIONES CONCRETAS EN AGRICULTURA.

- **Detección del estado hídrico de las plantas**, utilizando imágenes térmicas de elevada resolución espacial, obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAS/RPAS), con el propósito de obtener información que nos permita un mejor **aprovechamiento del agua**. El estrés hídrico en los cultivos provoca el cierre de los estomas, reduciendo la transpiración y aumentando la temperatura de las hojas, pudiéndose monitorizar a partir de sensores térmicos.
- **Detección de stress nutricional en cultivos** para posteriormente hacer un uso óptimo de **fertilizantes** sólo en las zonas en las que es necesaria su aplicación, y reduciéndose el costes de estos. A partir de la determinación del contenido de clorofila de las plantas se obtiene la concentración de nitrógeno de la hoja, ya que guardan relación, al detectar esta falta de nutrientes en los cultivos nos permitirá realizar un uso óptimo de fertilizantes, utilizando estos solo en las zonas en las que son necesarios.
- **Detección temprana de enfermedades y plagas** en cultivos, a partir de imágenes multispectrales, detectando así el stress en la vegetación producido por la presencia de plagas y enfermedades, generándose mapas diversos, que nos permiten detectar procesos en los cultivos en forma focalizada, así como dimensionar el problema y evaluarlo en forma puntual. Permitirá aumentar los beneficios económicos de los agricultores, evitará la aplicación innecesaria de compuestos fitosanitarios (herbicidas y pesticidas).
 - Detección y mapeo de **Plagas (malas hierbas, insectos, ácaros, hongos)** que permite que el tratamiento pueda ser realizado en el momento más conveniente para el cultivo, sin necesidad de esperas, que provoquen que el **(tratamiento plaguicida o pesticida)** se acabe aplicando en un momento poco adecuado. Originando para el agricultor un ahorro de **producto fitosanitario**, lo que tiene que ver con menor impacto económico en los costos de producción, además de beneficios relacionados a la sustentabilidad ambiental y el grado de sensibilidad que la sociedad adquirió ante la utilización de estos **insumos**. Como ejemplo las malezas resistentes es uno de los principales problemas que debe enfrentar un productor agropecuario en la actualidad, el control de las mismas es un trabajo constante que deberá perfeccionar para no perder rentabilidad en su unidad productiva.

Calderón et al (2013) detecto los cambios fisiológicos que la enfermedad de la Verticilosis causa en el olivar con el fin de cartografiar los daños ocasionados en estados tempranos.

A otro nivel, el CSIC también también ha desarrollado Drones biomiméticos para ahuyentar plagas aviares en cualquier tipo de cultivos agrícolas.

- Identificación y cuantificación de **árboles enfermos y especies invasoras**.

- **Evaluación de las medidas adoptadas para eliminación de plagas y enfermedades** mediante supervisión de áreas fumigadas y así poder evaluar la efectividad de las medidas de control que se hayan tomado. Mediante monitoreo a vista de pájaro del avance o retroceso de los procesos o actuaciones que se realizan en nuestra finca.
- **Controles en cultivos**, mediante **monitorización del estado de los cultivos** durante su ciclo fenológico, a partir de imágenes multiespectrales y de la captura de los datos de campo con equipos colectores de datos-PDA con GPS
 - Determinar el **estado de las plantas** (Vid y Olivos) en momentos críticos de su ciclo fenológico y proceder posteriormente a su recolección selectiva, o la aplicación de medidas correctoras.
 - Chequeos de vegetación mediante la determinación de los principales índices de calidad de un cultivo, esto nos ayudara a la toma de decisiones respecto al uso de fertilizantes.
 - Evaluación de daños en los cultivos debidos a fenómenos atmosféricos o climatológicos. Daños por heladas, inundaciones, sequias.
 - Poder supervisar la producción agrícola subvencionada, y control de subvenciones agrarias. Actualmente esto se está realizando mediante imágenes de vuelos aerotransportados o imágenes de satélites, sin embargo, lo UAS/RPAS pueden ser una herramienta de apoyo al control de campo, aportando una visión aérea del total de la explotación
 - Realizar inventariado de áreas cultivadas, debido a que la observación aérea ha sido siempre una herramienta potente para la generación de inventario de cultivos, aunque para grandes superficies los UAS/RPAS no ofrecen las prestaciones de un avión o satélite de muy alta resolución, pero son una herramienta más útil en lugares de difícil acceso, países con malas infraestructuras, o zonas con mucha cobertura nubosa.
- **Índices relativos a calidad en cultivos** (ej. Vid, Cereales), mediante MAPPEO AGRICOLA Y ANÁLISIS DE CULTIVOS, originando información valiosa que puede tener un impacto directo en la rentabilidad, a partir de las imágenes multiespectrales obtenidas desde un UAS/RPAS en combinación con parámetros medidos en campo.
 - **Método.**
 - Determinación de puntos de control (Check Point): Posteriormente realizamos un análisis Multitemporal de diferentes variables utilizando colector de datos, este análisis de variables combinadas junto a la cartografía base, nos darán puntos de control específicos, con ubicación en el espacio y valor de dicha variable.
 - Creación de mapas espacialmente representativos. Desde cada punto de control (Check Point), se obtienen valores específicos, obteniendo una nube de puntos, los que luego según modelos espaciales, son representados como mapas con escalas y estadísticas específicas.

➤ **Aplicación.**

- **Control de pesos y calibres**, que nos permitirán visualizar los puntos de muestreo en su ubicación exacta y posterior incorporación a sistema de información geográfica, La información procesada es trasformada en mapas, de caracterización de los frutos en relación a su peso y calibre.
- **Representatividad de variables agronómicas (PH, magnesio, nitrógeno) que afecten a la producción.** Estas variables generaran diferentes mapas los cuales nos permitirán ver si son factores limitantes que influyen en los rendimientos de las cosechas, o por el contrario no tienen correlación con el rendimiento, especialmente importante es la obtención de mapas de deficiencia de nitrógeno en el suelo, los cuales, ayudaran al agricultor a la toma de decisiones en cuanto a la aplicación de fertilizantes en las zonas más necesitadas.
- **Información agrometeorológica en tiempo real.** generando mapas con la distribución de las principales variables meteorológicas, como temperatura, humedad, precipitación, insolación, etc.

03. OBJETIVOS:

La principal potencialidad del uso de los UAS/RPAS en agricultura, es la de facilitar a los agricultores la capacidad de observar su explotación desde el aire, obteniendo así una perspectiva de su cosecha que les permita detectar las incidencias en cada campaña agrícola. Estas incidencias van desde problemas de fertirrigación hasta infestaciones de plagas y hongos que no se ven a ras de suelo.

Esta observación desde el aire no tiene porqué ser solamente en el rango del espectro visible que es lo que percibe el ojo humano, sino que puede hacerse en las regiones del infrarrojo reflejado y del infrarrojo térmico, mediante cámaras multiespectrales, donde la respuesta de los cultivos es más acusada y permite una mejor caracterización de lo que está ocurriendo en la explotación.

Cada tipo de cobertura presenta una firma espectral típica, directamente relacionada con sus características de composición, geometría, etc., de esta forma, la proporción de luz incidente que es reflejada, absorbida o transmitida depende de las características de la cobertura del suelo y de la longitud de onda analizada.

La firma espectral de la vegetación es condicionada por la presencia de pigmentos, la estructura de la hoja y su contenido en agua, que variará en función de la especie, su estado fenológico y otros factores. En el espectro visible (400-700 nm), los pigmentos fotosintéticos son los que condicionan la respuesta espectral de la vegetación, mientras que en la región del infrarrojo cercano (700-1.350 nm), es la estructura interna de la hoja el factor condicionante.

Los índices de vegetación, combinaciones o ratios de las bandas de la imagen, permiten aumentar las diferencias de reflectancia entre usos del suelo. Los más usados en estudios de teledetección para clasificar vegetación son, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, RVI (Ratio Vegetation Index), además de estos índices de vegetación, el estudio se realiza de los siguientes índices, R/G, NIR/G, GNDVI, NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index (Gitelson et al., 2002).

Así, el objetivo del presente Trabajo Final de Máster es analizar:

- ✓ Utilidad de los sistemas de información geográfica para tratar imágenes aéreas obtenidas sobre UAS/RPAS.
- ✓ Obtención de imágenes aéreas mediante cámaras multiespectrales montadas sobre UAS/RPAS, a partir de la colaboración de la empresa AereoConsult. Cartografiando diferentes variables agronómicas, y su utilidad para monitorizar los campos.
- ✓ Estudio de precisiones, resoluciones, productividad y costos aplicando esta tecnología.
- ✓ Posibles beneficios económicos para los agricultores.

Realizándose cálculo de índices de vegetación (NDVI, GNDVI, RVI, GVI, R/G, NGRDI), determinándose distintas zonas de manejo a partir de estos índices, y finalmente analizaremos la correlación y regresión existente entre, el índice más conocido y usado, (NDVI). Y los índices (GNDVI, RVI, GVI, R/G, NGRDI).

Con la idea de ver cuál de estos índices (GNDVI, RVI, GVI, R/G, NGRDI), obtiene unos resultados más parecidos o semejantes al NDVI.

04. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

La realización de este proyecto se lleva a cabo en Puertollano, esta es una localidad y municipio de la provincia de Ciudad Real, que pertenece a la comunidad autónoma de Castilla la Mancha.

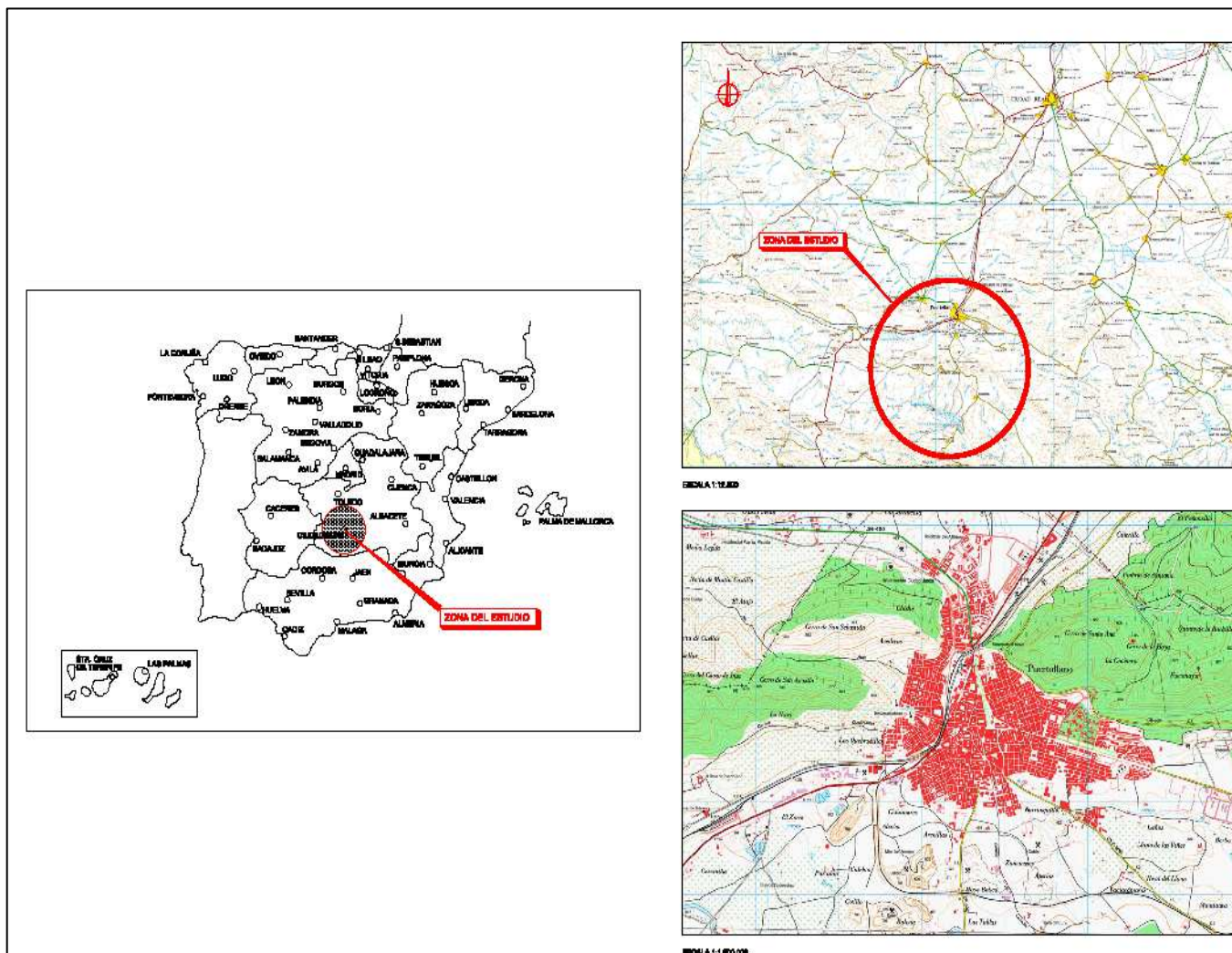


Figura 06. Localización

Puertollano se sitúa al sur oeste de la provincia de Ciudad Real y se encuentra a:

- ✓ 37 Km de la capital de Provincia.
- ✓ 22 Km del Aeropuerto de Ciudad Real.

Pertenece a la comarca de campo de Calatrava y se encuentra situado entre dos cerros, el de San Sebastián (800 metros) y Santa Ana (900 metros).

La finca objeto del presente estudio se encuentra situada al oeste del núcleo urbano de Puertollano, y separado del mismo unos 3.000 metros, en el sitio denominado Los Pedroches, en una franja delimitada al norte por la futura autopista Puertollano – Nacional IV, y al sur la línea de AVE Madrid- Sevilla.

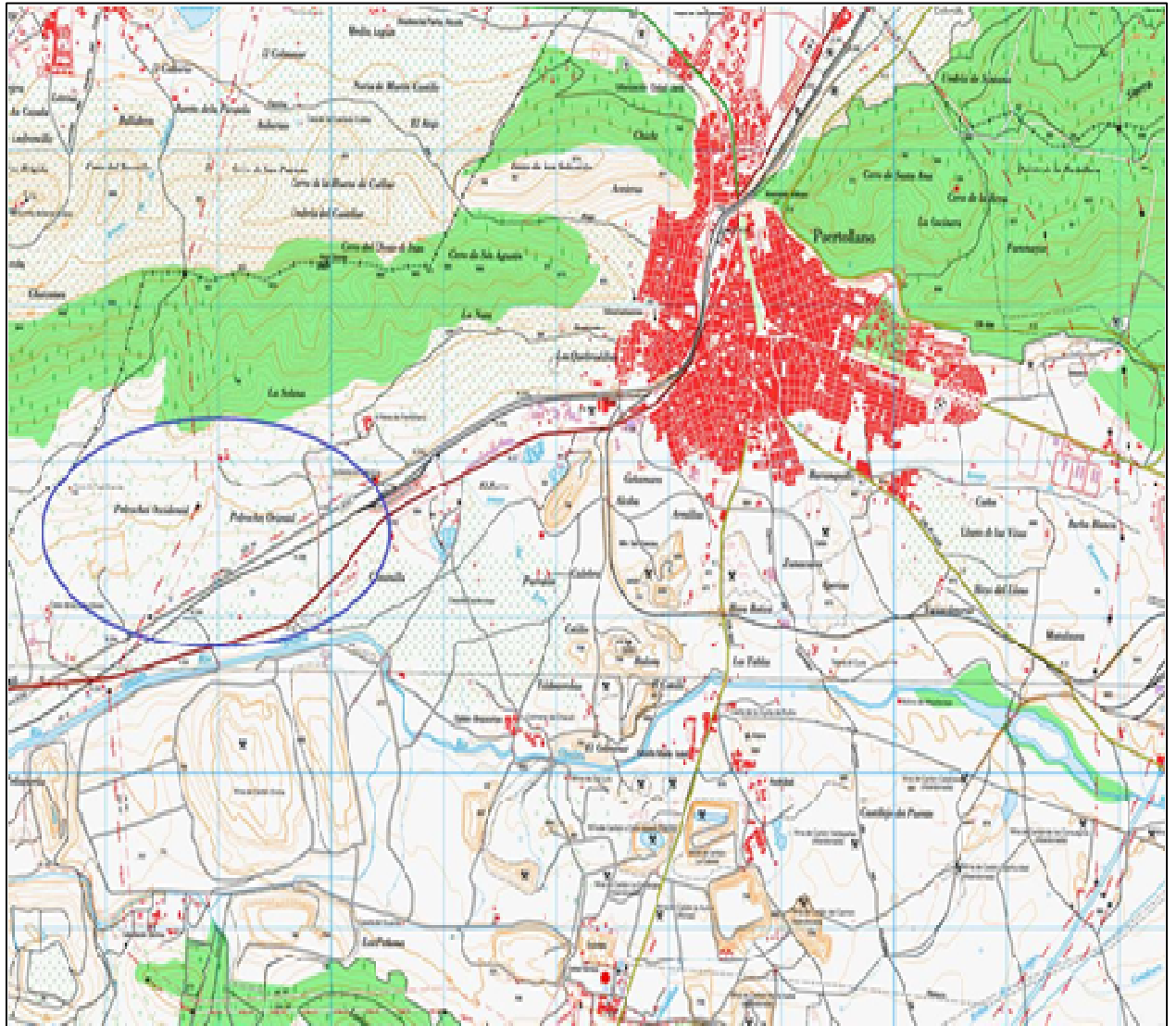


Figura 07. Área de estudio sobre Puertollano

La superficie de la zona a estudiar consta de 0.2143 Km² equivalente a 21.43 hectáreas, el relieve de dicha área presenta una orografía bastante suave y ondulada, siendo un relieve por lo general con bastante poco desnivel en zonas próximas a la finca, según nos vayamos alejando de la finca en dirección al noroeste esta orografía se irá haciendo más abrupta, caracterizando al paisaje una sucesión de pequeñas sierras.

La agricultura en Puertollano se caracteriza por la presencia de cultivos principalmente de viñedos, olivares y campo de cereales, así como amplios campos pastizales, además de campos baldíos.

Esta finca en concreto, se encuentra cultivada por trigo, que es el tipo de cultivo predominante que se da en el área de estudio. Además las fincas próximas, también se encuentran cultivadas con diferentes tipos de cereales, tales como maíz, cebada, trigo.




Figura 08. Vista parcial de la finca de estudio



Figura 09. Área de estudio

05. MATERIALES Y METODOLOGÍA

05.01-MATERIALES.

El sistema con el que vamos a realizar el trabajo, es el UAS/RPAS perteneciente a la empresa  **AeroConsult**, con el cual nos realizan la toma de imágenes aéreas, es un aparato volador de propulsión eléctrica, con capacidad de despegue y aterrizaje vertical, que incorpora a bordo tecnología avanzada, gracias a la cual permite estabilizar y volar mediante la incorporación de GPS.

Este sistema está formado por:

- ✓ Plataforma aérea. Chasis en fibra de carbono y seis rotores
- ✓ Soporte giroestabilizador y antivibratorio sobre el que se monta los sensores.
- ✓ Estación de tierra para su manejo y monitorización. La transmisión de las imágenes captadas a la estación de tierra se realiza mediante dos transmisiones inalámbricas de diferente frecuencia.
- ✓ Sensor de medida (cámara fotográfica, video, térmica, multiespectral).
- ✓ Sistema de imagen sobre la propia estructura del dron, con detector de colisión mediante ultrasonido.
- ✓ Sistema informático con PC y Software.

Especificaciones técnicas	
Dimensiones	1050 mm diámetro
Payload max	2000 gr
Alcance	3000 m
Velocidad	35 Km/h
Viento	15 Km/h
Telemetría disponible	Datos GPS
	Nivel Batería
	Altura
	Velocidad
	Temperatura
	Consumos
	Distancia
	Nivel de señal
Aviso de alarmas	



Figura 10 .Especificaciones técnicas y equipo

Gracias a todos estos dispositivos los vehículos no tripulados tienen la capacidad de llevar a cabo misiones automáticamente. Permitiendo la toma de imágenes con diferente tipo de sensores tales como cámaras fotográficas (Sensor RGB), cámara de video, cámaras térmicas, cámaras multispectrales, cámaras hiperespectrales, pudiéndose modificar desde tierra, la posición de la cámara desde la vista cenital a la perspectiva general.

Sensor Multispectral (Cámara multispectral, Tetracam ADC Micro):

A bordo del UAS se instaló una cámara aérea multispectral que genera imágenes en tres bandas (verde, rojo e infrarrojo cercano).

Las imágenes en el espectro infrarrojo, junto con las del espectro visible, son particularmente útiles en agricultura dado que visualizan las concentraciones de clorofila en las hojas o tasas de actividad fotosintética, detectando procesos en los cultivos tales como el stress en la vegetación producido por la presencia de plagas y enfermedades, falta de agua, problemas de suelos o baja de nutrientes (stress nutricional).



Figura 11. Cámara Multispectral Tetracam ADC Lite

Estas imágenes serán posteriormente procesadas digitalmente y mosaicadas, generando mapas que nos ofrecerán información sobre el estado de los cultivos.

Las características principales del sensor son:

PARAMETROS	
Dimensiones del sensor (mm)	6.55x4.92
Longitud focal de la lente de la cámara (mm)	8.43
Resolución espacial de la cámara (Píxeles/ Mpixel)	2048x1536 3.2
Resolución espectral de la cámara (nm)	520 a 920
Tamaño del Pixel (Micrones)	3.2
Dimensiones del sensor (mm)	75x59x33
Peso del sensor (Gramos)	90

Tabla 03. Características del sensor

En función de la altura de vuelo tendremos las siguientes resoluciones

Altura Pies	Altura en metros	Resolución (mm x Pixel)	Campo de visión Huella (metros)
400	122	46.3	95x71
0	213.4	81	165x125
1200	365.8	138	284x213
3000	915	347	711x534

Tabla 04. Resoluciones según altura.

Software.

El software utilizado es PIX4D, el cual combina las imágenes aéreas tomadas por los sistemas aéreos remotamente pilotados (UAS/RPAS), convirtiéndolas en mapa 2D o 3D, mediante la obtención de nube de puntos, modelos digitales del terreno (DMS) y Ortomosaicos.

Ventajas:

- Precisión profesional mediante la automatización del proceso.
- Aumento de productividad.
- Integración en otros Softwares (Microstation, AutoCAD, Erdas, ArcGis.)

05.02-METODOLOGÍA.

A continuación se describe la metodología desarrollada para la generación de los mapas de diferentes índices.

1. Diseño del vuelo.

Esta fase, en la que se decide la altura de vuelo y la cámara usada, es de vital importancia para conseguir imágenes con la resolución adecuada. Es necesario tener en cuenta el objetivo que se persigue y el cultivo en que se trabaja, ya que esto influye sobre la altura a la que se volará y a su vez ésta determina la resolución espacial de las imágenes, el número de imágenes necesarias para cubrir el cultivo y la duración del vuelo, aspecto muy importante para evitar problemas con la autonomía del vehículo (Torres-Sánchez et al., 2013).

Si se busca la detección de plantas individuales en cultivos de hilera estrecha como el trigo, es necesario trabajar con resoluciones espaciales de en torno a 1 cm, lo que obliga a volar a una altura de unos 30 m con la cámara Olympus. En cambio, si se quieren mapear rodales de malas hierbas en cultivos en hilera ancha como maíz o girasol, se puede trabajar con resoluciones de unos 5 cm que se consiguen volando a unos 100 m con la cámara multiespectral y a 130 m con la convencional.

Una vez seleccionada la altura de vuelo adecuada para el desarrollo de nuestros objetivos, se diseña el plan de vuelo con el software propio del UAS y finalmente se implementa en el vehículo.

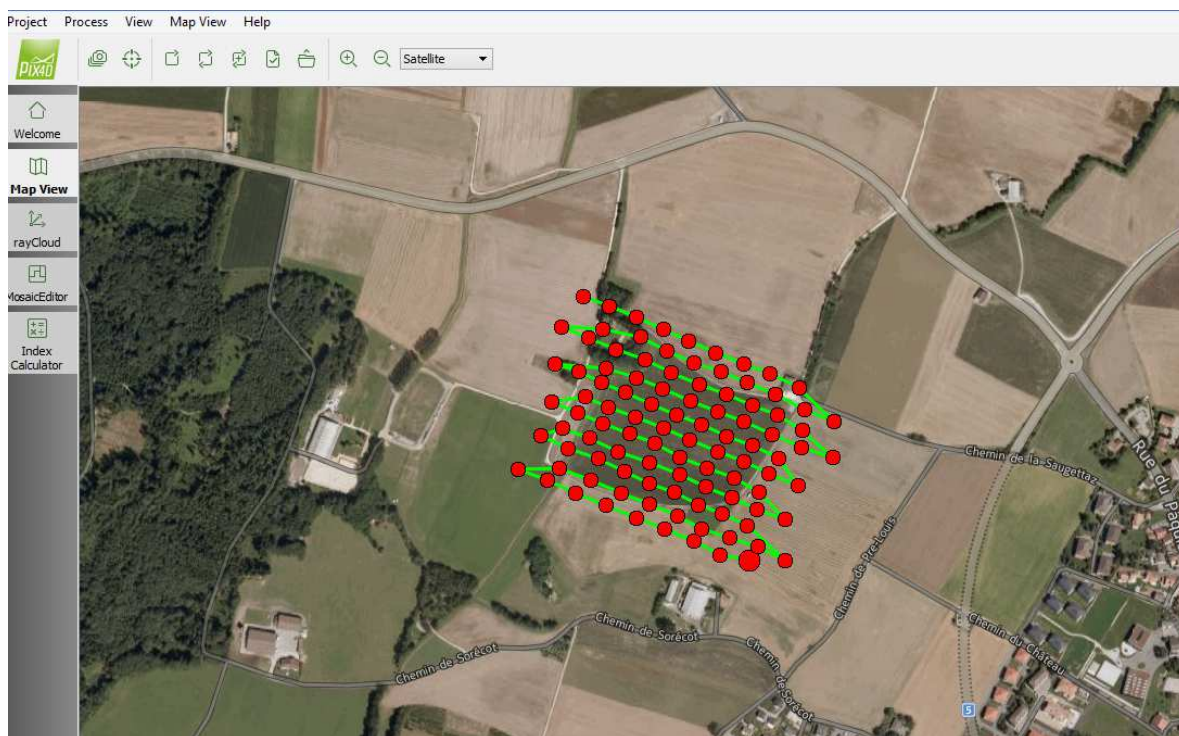




Figura 12. Plan de vuelo.

2. Ejecución del vuelo.

La ejecución del vuelo es realizado por la empresa  la cual dispone de experimentados pilotos para la realización de estas operaciones.

En el campo de cultivo, se instala la cámara a bordo del UAS y, tras el despegue manual, se activa la ruta de vuelo programada para que el vehículo comience automáticamente a recorrer el campo de cultivo tomando numerosas imágenes hasta que lo ha sobrevolado por completo. En ese momento se pasa a control manual para proceder al aterrizaje. Durante todo el tiempo de vuelo el UAS/RPAS envía a la estación base información sobre diferentes aspectos como: posición, estado de las baterías o potencia de los motores.



Figura 13. UAS/RPAS con Cámara Multiespectral Tetracam ADC Lite ()

3. Pre-procesado de las imágenes.

Las imágenes tomadas durante el vuelo son trasladadas desde la cámara a un ordenador. Los archivos generados por la cámara convencional pueden ser usados tal cual, sin embargo los de la cámara multiespectral necesitan cierto tratamiento previo para poder ser procesadas. Antes del análisis de las imágenes que generará los mapas, es necesario un proceso de mosaicado. Dicho proceso consiste en combinar y dar coordenadas a todas las imágenes tomadas en vuelo de forma que al final se obtenga una única imagen (denominada ortoimagen) que muestre el campo de cultivo en su totalidad.

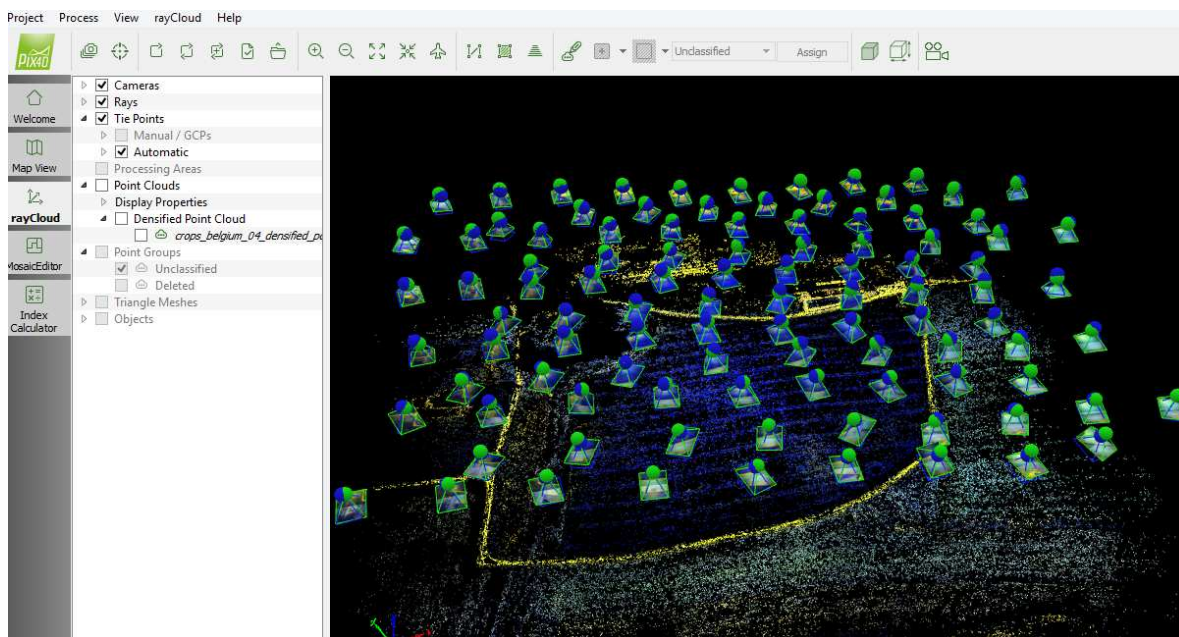


Figura 14. Procesado de imágenes

4. Generación de mapas.

El software PIX4D nos permite generar a parte de los Ortomosaicos, nube de puntos, modelos de elevaciones, diferentes ficheros en formato (*.TIFF) con cada índice que deseemos calcular. Dicho software, contiene los índices más comunes y utilizados por defecto, pero aparte podemos calcular cualquier combinación de las diferentes bandas de las que poseamos información.

Una vez dispongamos de los diferentes Índices en formato (*.TIFF), podremos trabajar con ellos desde ArcGIS, u otro software de similares características.

05.03-ESQUEMA DE PROCESOS.

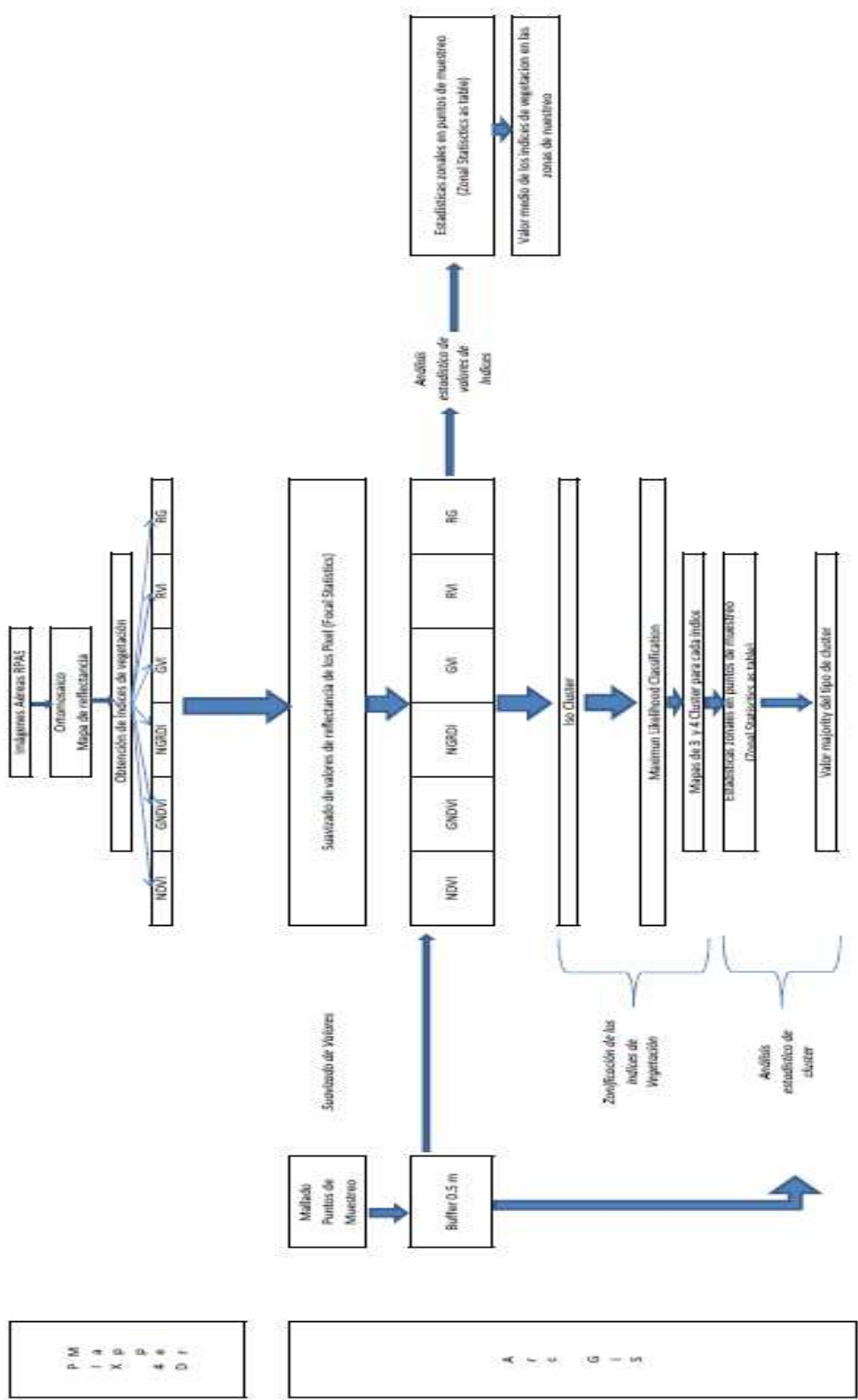


Figura 15.Esquema de procesos

05.04-INDICES DE VEGETACIÓN Y PUNTOS DE MUESTREO.

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Permitiéndonos estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan.

Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable. Existe una variedad de índices de vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo.

A continuación mostramos los índices de vegetación en los que vamos a realizar el estudio de este proyecto.

05.04.01-NDVI

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI Normalized Difference Vegetation Index). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse et al., 1974).

Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta.

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR).

Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas.

El cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED).

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}}$$

Donde NIR es la reflectancia espectral del canal infrarrojo cercano y RED representa la reflectancia en el canal rojo del visible. Esta fórmula indica que existe una relación inversa entre el valor de reflectancia de estas bandas, por lo que es posible su uso para discriminación de cubiertas vegetales.

Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores.

05.04.02-GNDVI

Éste es, una variante del NDVI que utiliza la banda del verde en lugar de la del rojo (Kemerer, 2007). Su fórmula es la siguiente:

$$\text{GNDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{GREEN}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{GREEN}}}$$

Este índice se ha mostrado muy útil para estimar el rendimiento del cultivo de arroz inundado, en el que se dispone de parcelas fertilizadas con purín porcino y nitrógeno mineral a distintas dosis (Uso de imágenes aéreas multiespectrales para estimación del rendimiento en cultivo de arroz b. Moreno-García, M. Guillén, M.A. Casterad, D. Quílez) dando coeficientes de determinación bastante elevados.

05.04.03-RVI

Peason & Miller (1972), proponen este índice, consideramos a estos como los pioneros de la historia de los índices de vegetación al proponer el primer índice, este es el RVI (Ratio Vegetation Index), como su nombre indica, es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, estando este basado en la diferencia espectral en la vegetación en las longitudes de onda del rojo y del infrarrojo cercano.

$$\text{RVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{RED}}}$$

Este tipo de índices basados en pendientes tiene el problema de que la escala de

05.04.04-GVI

GVI (Green Vegetation Index) Índice de vegetación verde o como también se le conoce GRVI (Green Ratio Vegetation Index), (Sripada et, al. 2006) como su nombre indica, es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del verde.

$$\text{GVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{GREEN}}}$$

05.04.05-NGRDI

Este índice es el (Normalized Red Green Difference Index, Gitelson et al.,2002). , también llamado VIgreen (VIg), Vegetation Index Green (Gitelson et al.,2002).

$$\text{NGRDI} = \frac{\rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{RED}}}$$

El cálculo del NGRDI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el verde (GREEN) y el rojo (RED).

05.04.06-RG

Con este índice pretendemos calcular un índice que excluya la banda del infrarrojo cercano y ver la relación entre las bandas rojo y verde, con el índice de vegetación normalizado NDVI

$$RG = \frac{\varphi_{RED}}{\varphi_{GREEN}}$$

05.04.07-PUNTOS DE MUESTREO Y BUFFER.

Con el fin de determinar unos puntos de chequeo que nos recubran toda la superficie sobre la que vamos a realizar el estudio. Generaremos una malla con puntos de muestreo, en estos puntos de muestreo pretendemos ver, tanto la correlación como la regresión que existe entre el índice de vegetación (NDVI), con cada uno de los índices de vegetación restantes (RVI, GVI, R/G, NGRDI, GNDVI).

La separación entre cada punto de chequeo va a ser de 25x25 metros, estableciéndose un marco o mallado de esas dimensiones.

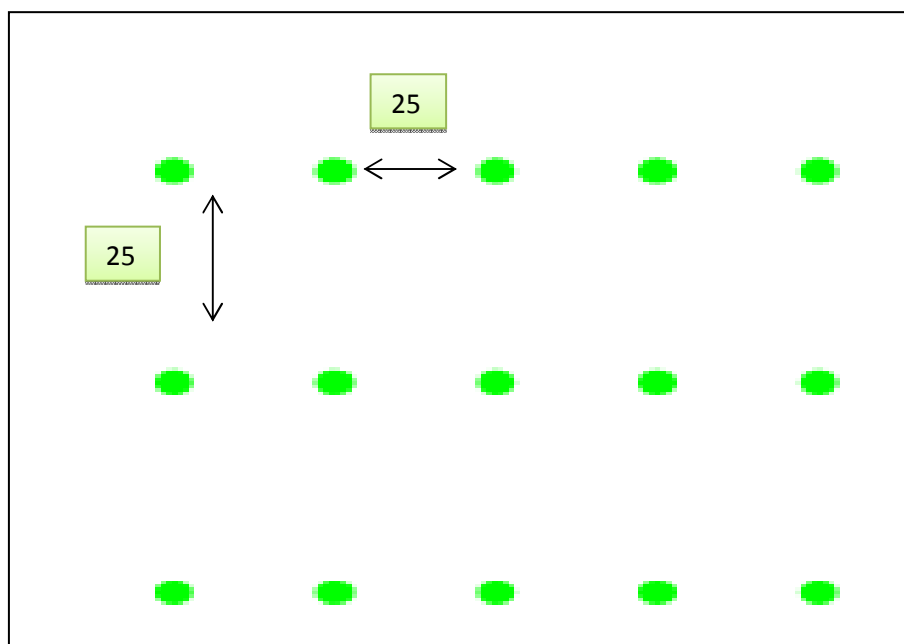


Figura 16. Esquema puntos de muestreo

Una vez que tengamos definida la malla con todos los puntos de muestreo, y debido a la gran cantidad de puntos que tenemos, seleccionamos solo una serie de puntos que pertenecen a tres parcelas, en las que realizamos el estudio de los índices. El número total de puntos de muestreo en el área de trabajo, es de 117, distribuidos sobre tres parcelas a estudiar de la siguiente manera.

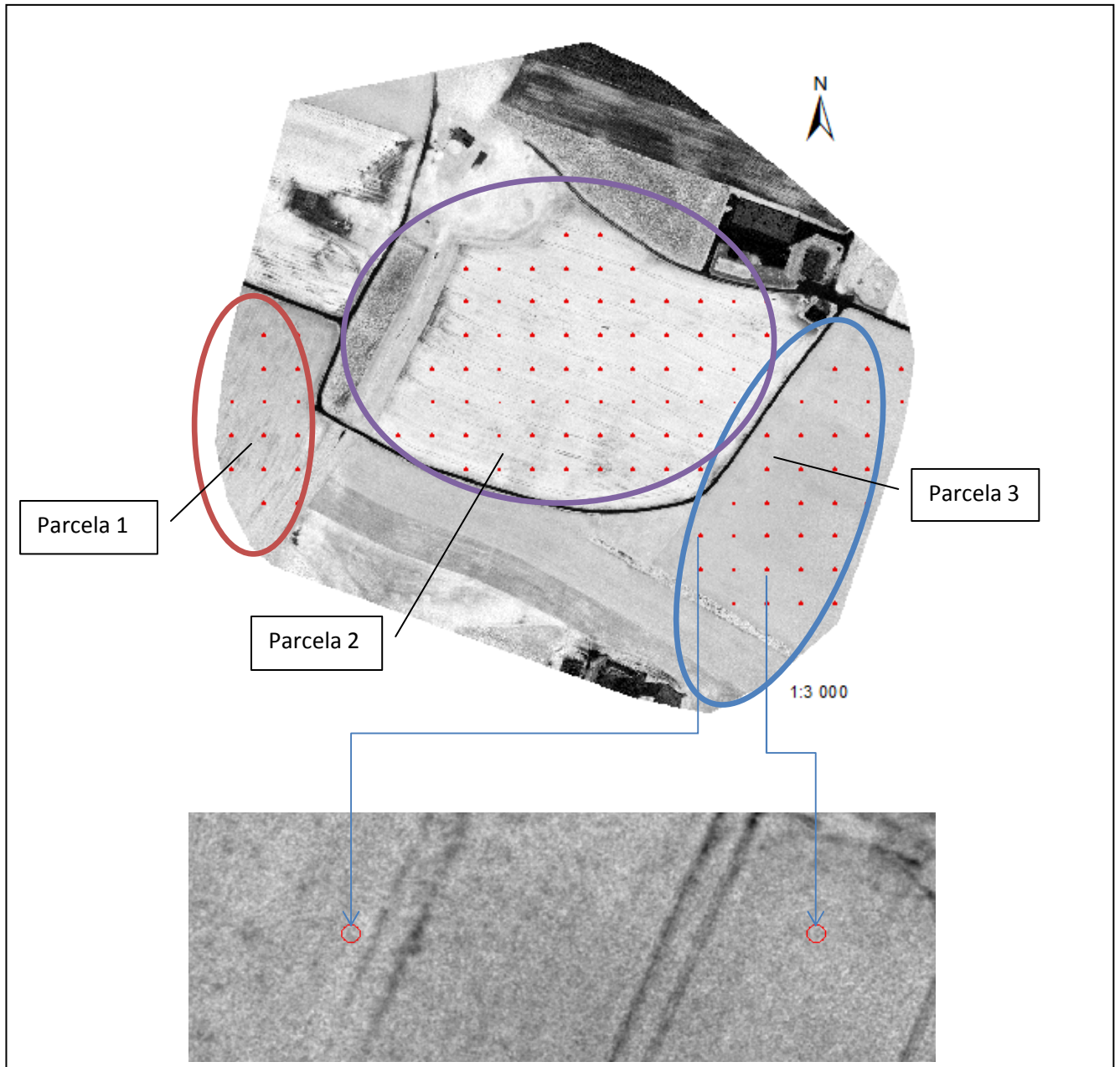


Figura 17. Distribución de puntos de muestreo en Parcelas y Buffer de Puntos de muestreo

Por otra parte y con el fin de no estudiar solamente el valor de un pixel correspondiente a un determinado punto de muestreo, realizaremos *Buffer* de 50 cm alrededor de dicho punto para testear esa zona, tal y como se puede observar en la figura 15 y así estudiar un conjunto de pixeles.

06. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

06.01- ÍNDICES DE VEGETACION (ESCENARIO 1):

06.01.01. Mapa de Reflectancia:

Con las imágenes obtenidas a partir del vuelo realizado con UAS/RPAS mediante una cámara multispectral que trabaja con tres bandas (Red, Green, NIR). Obtendremos primeramente un mapa de reflectancia, a partir del software PIX4D Mapper, previa corrección radiométrica.

El mapa de reflectancia sin corrección radiométrica presenta la reflectancia de los objetivos en cada banda.

Además este mapa, no tiene en cuenta una serie de factores que cambian en cada toma, tales como:

- ✓ Nubes
- ✓ Hora de la captura,
- ✓ Altitud.
- ✓ Atmósfera e la iluminación

Por eso, los índices, basados en el mapa de reflectancia, no han sido corregidos radiométricamente, siendo estos índices parciales.

Para generar un mapa de reflectancia preciso, hay que hacer una calibración radiométrica del (Data Set). Esta calibración la realizamos primeramente en campo, tomando una imagen de una diana con valores conocidos de reflectancia (valores albedo) para las tres bandas. Posteriormente en oficina y con el software PIX4D Mapper, hay que marcar esta diana en las imágenes para calibrar radiométricamente el data set ya que se generará esa imagen con unos valores de reflectancia diferentes a los valores albedo, la corrección en el resto de las imágenes la realizamos en función de la diferencia entre valores obtenidos y valores albedo.

De esta manera se genera un mapa de reflectancia, con correcciones radiométricas y consecuentemente unos índices precisos.

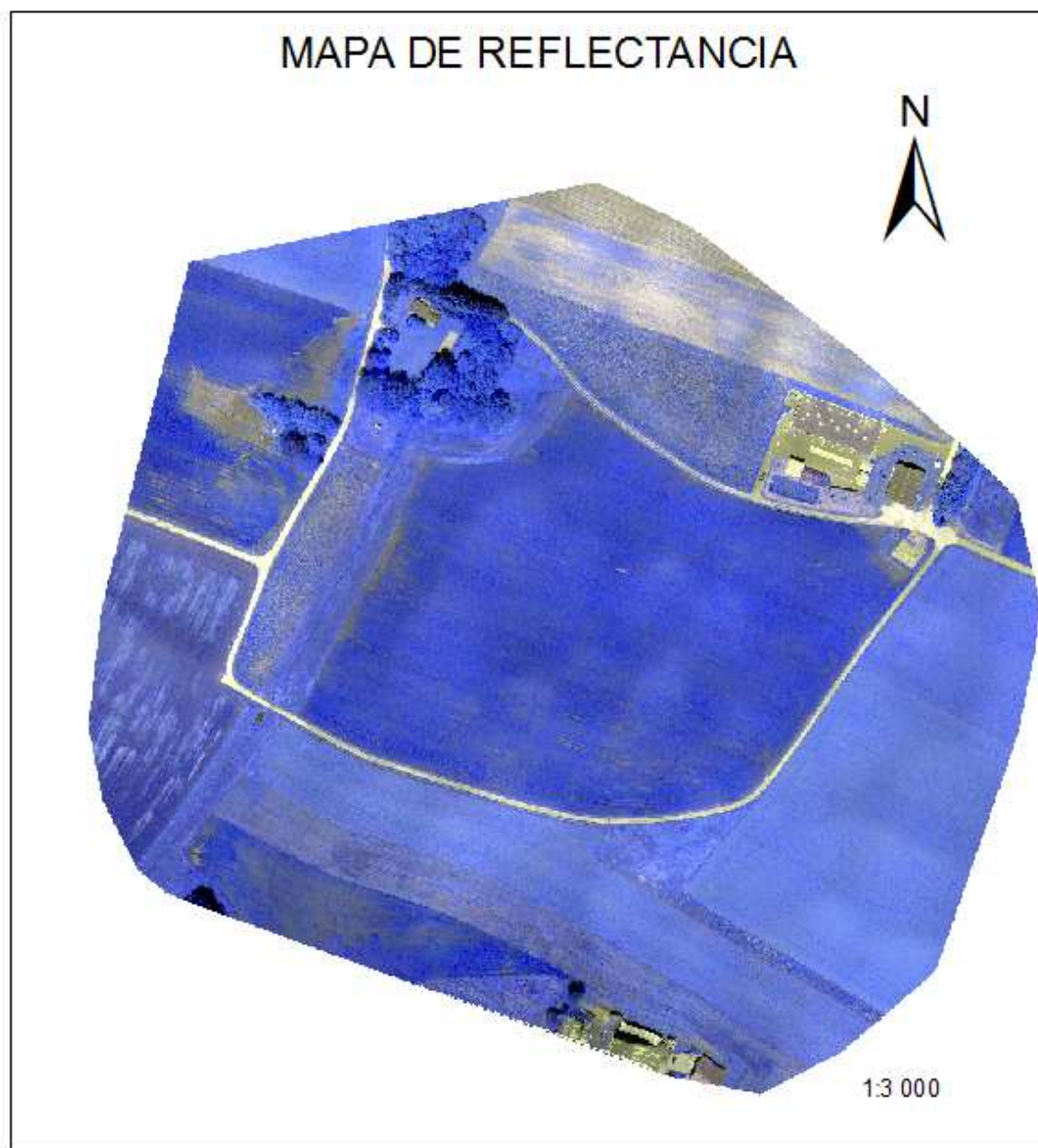


Figura 18. Mapa de reflectancia

06.01.02. Índices Brutos

A partir de estos valores de reflectancia, y mediante la combinación de sus bandas se generará los diferentes índices que queremos calcular, esto lo realizaremos apoyándonos en el software PIX4D Mapper. Mostramos a continuación el resultado del índice RVI.

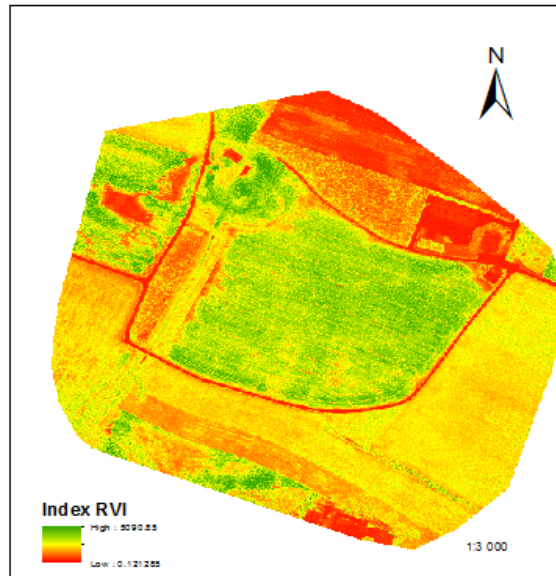


Figura 19. RVI a partir de Valores de Reflectancia.

06.01.03. Índices Brutos solo en zonas donde NDVI > 0.2

Posteriormente con el fin de trabajar solo en las zonas donde tengamos vegetación (NDVI > 0.2) vamos a excluir todas las zonas en las que el NDVI sea menor que 0.2, haciendo para ello una reclasificación del NDVI en la que a los píxeles con valor menor de 0.2, se le asigna NO DATA. Posteriormente se excluye esa zona con NDVI < 0.2 en el resto de los índices de vegetación utilizando la herramienta *Raster Calculator* de ArcGIS.

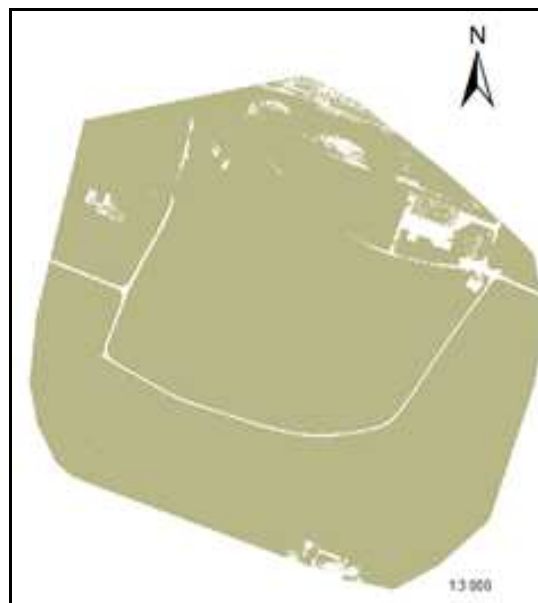


Figura 20. Zonas con NDVI > 0.2

06.01.04. Valores definitivos de los índices:

Estos índices son obtenidos mediante la realización de dos operaciones con el fin de obtener unos valores más suavizados y depurados, y además trabajar solo en zonas con vegetación.

1. Excluir zonas con $NDVI < 0.2$ en el resto de los índices de vegetación utilizando para ello la herramienta *Raster Calculator* de ArcMap 10.1.
2. Con el fin de suavizar los valores de los píxeles de los diferentes índices calculados y también para evitar posibles errores puntuales de valores de medida de reflectancia así como picos en la toma de datos de reflectancia, y su influencia en el cálculo de índices de vegetación, vamos a realizar una operación de análisis focal o vecindad para promediar los valores de los índices en ventanas 3x3, además de eliminar valores que se salgan de las tendencias de cada índice.

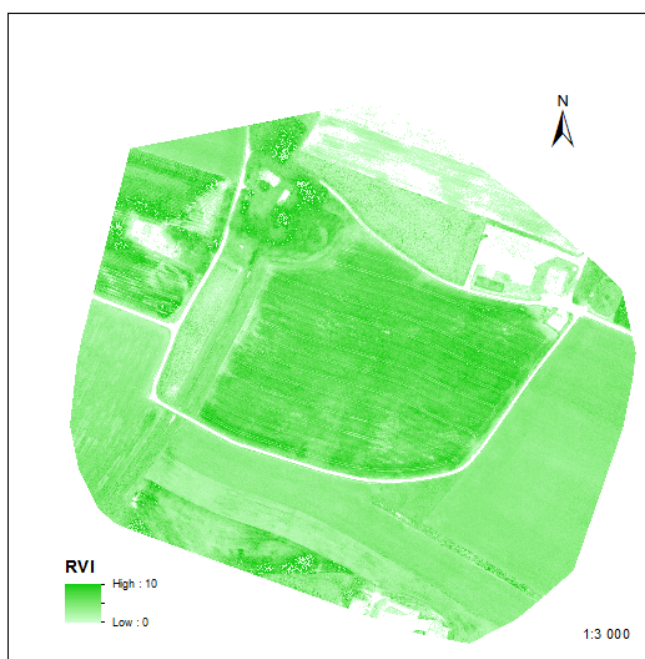
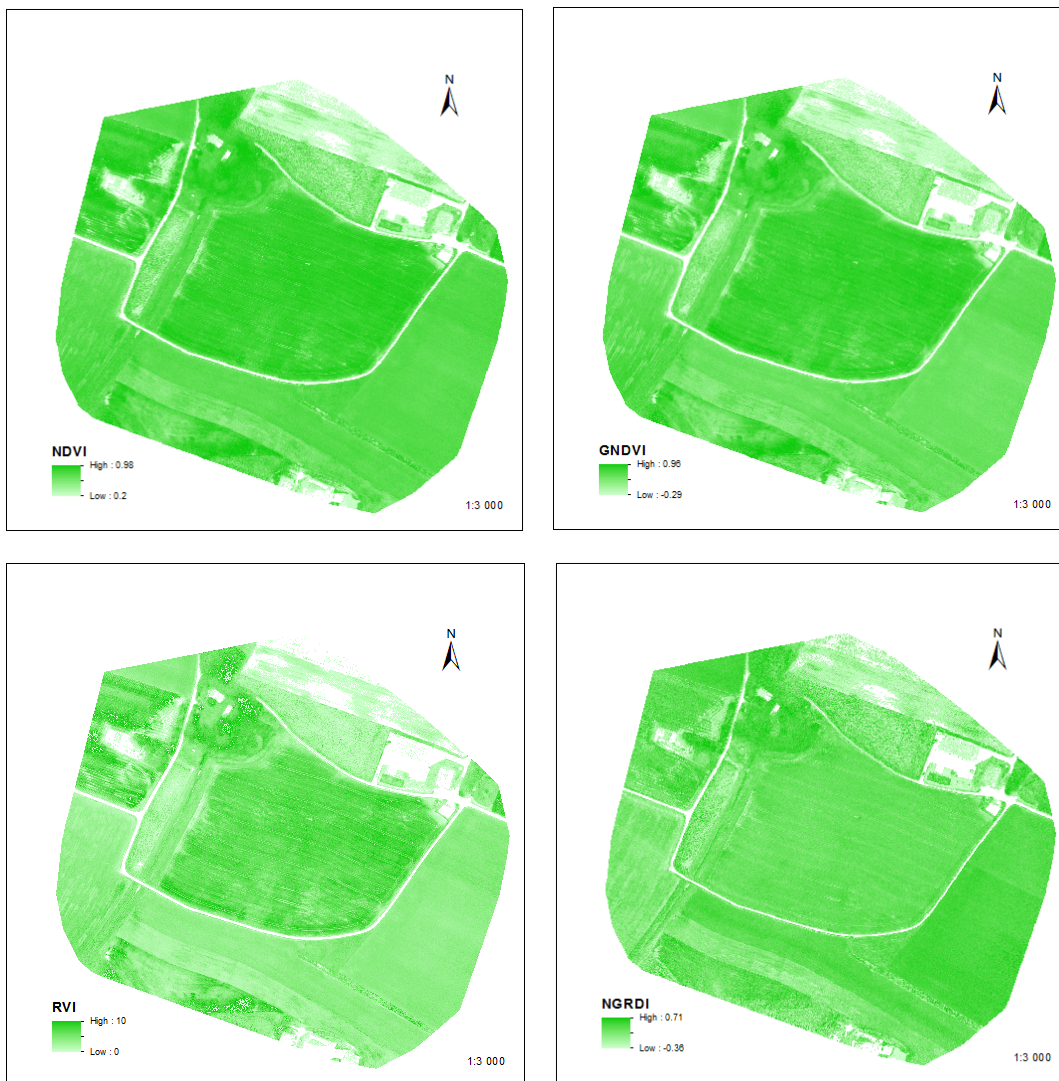


Figura 21. RVI: Definitivo.

06.02-MAPAS DE INDICES DE VEGETACIÓN (ESCENARIO 1).

Estos mapas son obtenidos a partir de la combinación de bandas, las cuales tienen datos de reflectancia, corregidos geométricamente. Además vamos a suavizar los valores de los pixeles (análisis focal) y excluirémos aquellas zonas en los que NDVI es menor de 0.2.



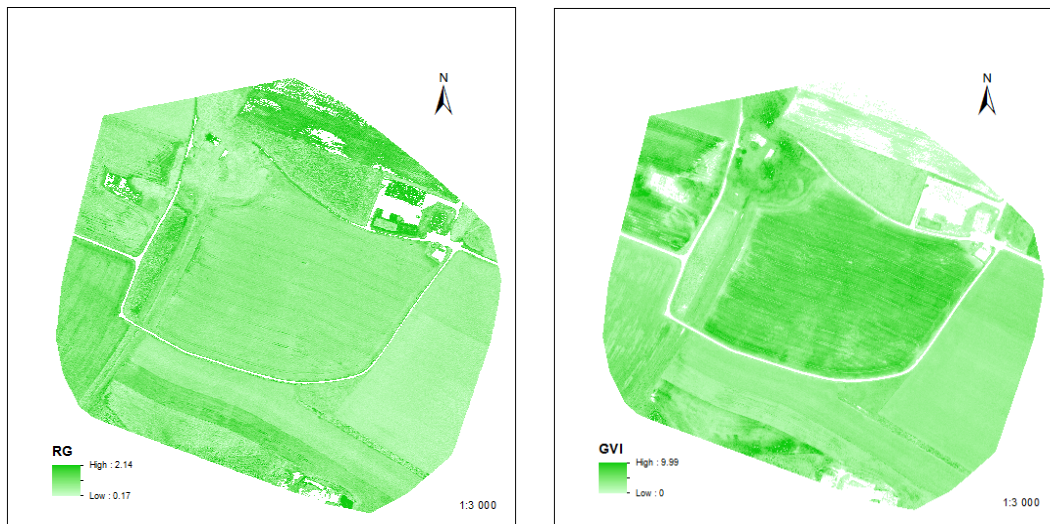


Figura 22. Indices de vegetacion. Sin Escala.

Mediante estos mapas de índices de vegetación, la conclusión principal que se hace es que en los mapas de los índices NDVI y GNDVI, coinciden las zonas que presentan valores más altos, como las zonas con valores menores, por lo que estos dos índices marcan a cada pixel unos valores muy parecidos. Además estos dos índices generan unos rangos de valor muy similares entre ellos comprendidos entre 1 y 0.2.

Por otro lado, los índices GVI y RVI, también originan visualmente las mismas zonas con semejanza entre los valores calculados.

Los mapas que peor relación tienen con el índice NDVI son los calculados mediante los índices RG y NGRDI.

El índice RG, marca unas zonas con valores mayores en la zona norte que es totalmente contraria a lo que indica el NDVI. Además este índice RG, muestra una distribución bastante homogénea de la vigorosidad.

Por el contrario en índice NGRDI, no comete los errores del RG en la zona norte, ya que se observan en las mismas tonalidades que el NDVI, pero sí que se observa, que en la parcela principal o central hay valores menores con respecto al NDVI y además en la parcela más hacia el este, en el índice NGRDI es la zona con valores mayores, cosa que no sucede en el índice NDVI.

06.03-ZONIFICACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS CLUSTER (ESCENARIO 2).

Este análisis consiste en la agrupación formando clúster de los elementos analizados o metadatos (valores de los índices depurados), obteniendo un tipo de clasificación de los datos, es decir, la finalidad es clasificar n objetos en K ($K > 1$) clúster o grupos, mediante la utilización de p ($p > 1$) variables. Estos grupos se forman en función del grado de similitud entre los miembros del mismo clúster.

En este trabajo vamos a obtener mapas, agrupándolos en tres clúster, de cada uno de los seis índices a estudiar (NDVI, GNDVI, RVI, RG, GVI, NGRDI).

Para realizar esta operación utilizaremos dos herramientas de ArcGIS:

- *Iso Clúster*: Crea un archivo de firmas, utilizando un algoritmo clustering de datos ISO y así determinar las características de los grupos naturales de celdas en un espacio de atributos multidimensional.

- *Máximum likelihood classification*: Realiza una clasificación de máxima verosimilitud, a partir del archivo de firmas anteriormente creado.

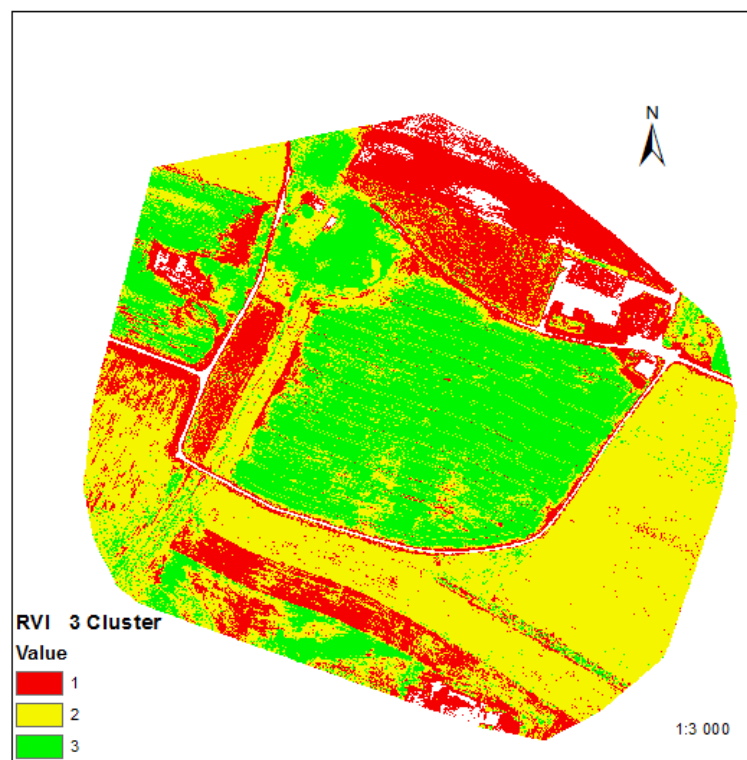


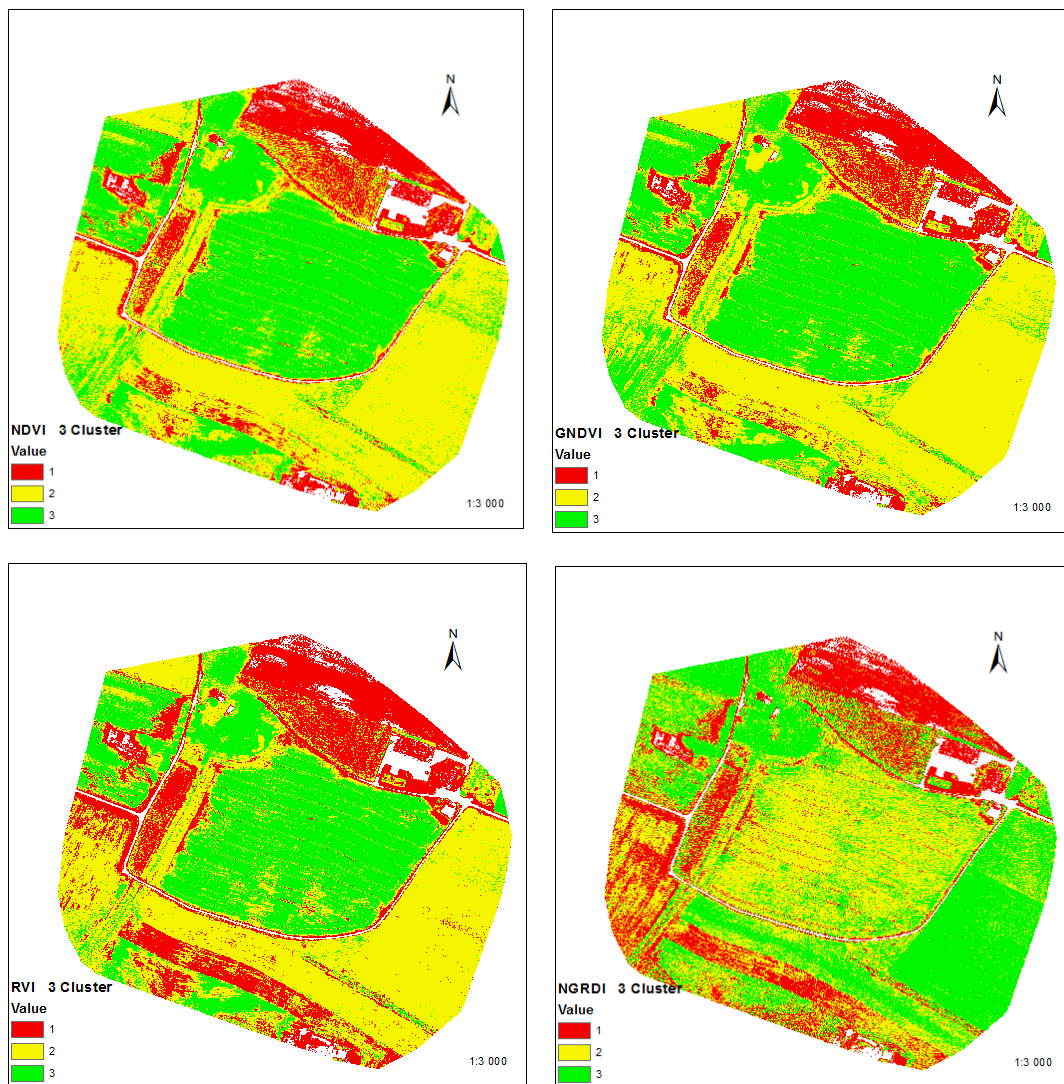
Figura 23. Zonificación RVI

El valor mayor (3) corresponde con la agrupación de los píxeles de mayor vigorosidad vegetativa, siendo el valor de 1 el correspondiente a la agrupación de menor vigorosidad.

06.04-MAPAS ZONIFICACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS CLUSTER (ESCENARIO 2).

En las siguientes figuras se muestran los mapas de los clúster realizados para cada uno de los seis índices de vegetación.

El clúster del grupo 1 corresponde a una zona de menor vigorosidad mientras que las zonas de clúster del grupos 3 corresponden a zonas de alta vigorosidad. Se puede apreciar un gran parecido en la zonificación realizada entre los mapas de los índices de vegetación NDVI y GNDVI, también es muy similar entre ellas la zonificación realizada entre los índices RVI y GVI, aunque difieren algo respecto de la zonificación realizada en los mapas del índice NDVI.



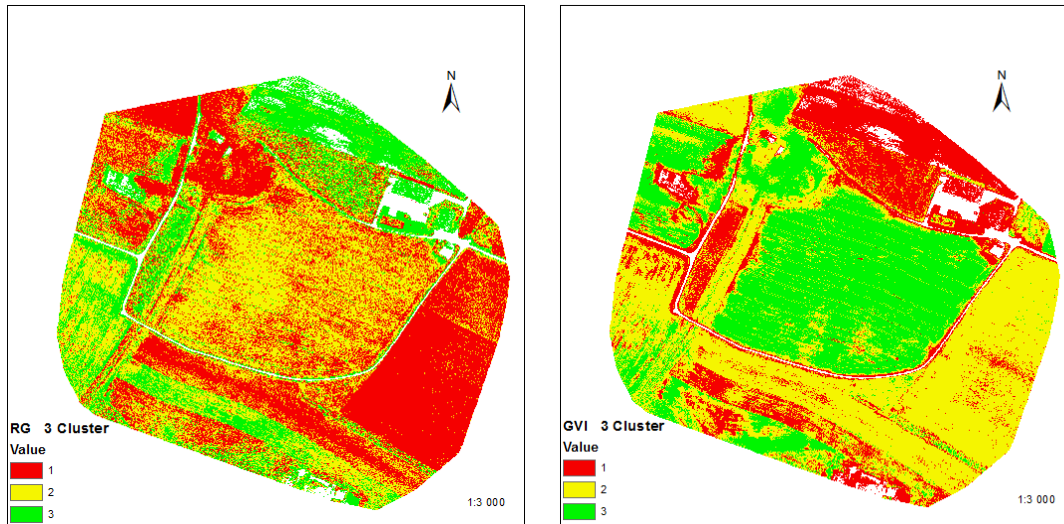


Figura 24. Zonificación de Índices de vegetación. Sin Escala.

Por otro lado son muy diferentes respecto a la zonificación del NDVI, las obtenidas a partir de los índices de vegetación RG y NGRDI. Al igual que sucedía en los mapas de índices de vegetación

06.05-ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Con este análisis estadístico, lo que pretendemos es comprobar dos aspectos diferentes, por un lado, medir el grado en que dos variables se encuentran relacionadas, y por otro como se relacionan estas variables, con el fin de poder predecir valores de una variable (variable criterio o dependiente) en función de otra variable (variable predictora o independiente), cuantificando previamente la relación entre las dos variables en términos de una función lineal específica (recta de regresión).

Al medir el grado en que se encuentran relacionadas las variables, veremos primeramente la representación gráfica de la correlación entre dos variables mediante diagramas de dispersión y posteriormente la relación que tiene cada una de las variables calculando el estadístico de correlación lineal de Pearson y bondad del ajuste a partir del cálculo del coeficiente de determinación R^2 .

Estos dos tipos de análisis (correlación y regresión) lo vamos a realizar en dos escenarios completamente diferentes que planteamos en este proyecto:

- ✓ Escenario 1: Valores de los índices de vegetación.
- ✓ Escenario 2: Valores de la zonificación o clusterización de los diferentes índices.

Para ello trabajaremos con los buffer de cada punto de muestreo, con el valor de los diferentes índices de vegetación definitivos, y con la zonificación de los distintos índices, realizando las dos operaciones anteriormente nombradas:

- ✓ Escenario 1: Un análisis estadístico de los valores de los diferentes índices de vegetación (GNDVI, RVI, RG, GVI, NGRDI) respecto al índice NDVI, utilizando la herramienta de ArcGIS (*Zonal Statistics as table: statistics type mean*) y obteniendo, para cada uno de los índices y en cada uno de las zonas (buffer) de muestreo, un valor o un dato, con la media zonal de los valores de los píxeles, utilizaremos para ello como archivos de entrada, el fichero buffer de los puntos de muestreo, y los valores definitivos de cada uno de los índices de vegetación. Este análisis se realizará en un entorno o buffer de 50 cm de cada punto de muestreo, con el fin de no analizar el valor puntual de un solo píxel, y si analizar el valor de los diferentes índices de vegetación de una zona próxima o entorno al punto de muestreo.
- ✓ Escenario 2: Un análisis estadístico de la Clusterización de los índices, conociendo en cada uno de los índices de vegetación en que clúster se encuentra cada zona de muestreo, calcularemos para ello el valor más repetido dentro de cada buffer (Zona de muestreo) de la zonificación anteriormente realizada, para ello utilizamos la herramienta de ArcGis (*Zonal Statistics as table: statistics type majority*). De esta manera veremos mediante análisis estadístico, relaciones entre las agrupaciones realizadas en el NDVI con las agrupaciones realizadas en el resto de índices (GNDVI, RVI, RG, GVI, NGRDI), al igual que el análisis anterior se realizará en un buffer de cada punto de muestreo, haciendo así un análisis zonal y no puntual.

Con el valor promedio de cada uno de los índices, dentro del buffer de cada punto de muestreo, obtenemos los anexos que se adjuntan al final de proyecto (Página 70).

Con el valor de la moda de cada una de las zonificaciones para cada índice, dentro del buffer de cada punto de muestreo, obtenemos anexos adjuntados al final de este proyecto (Página 73).

Una vez calculado los valores promedios zonales de cada uno de los índices (Escenario 1), como los valores moda, también zonales, de cada zonificación de los índices (Escenario 2) realizamos dos análisis diferentes:

Análisis de correlación: Este análisis es un grupo de técnicas estadísticas usadas para medir la fuerza de la relaciones entre variables, para ello obtendremos

- ✓ Diagrama de dispersión: En el que representaremos gráficamente la relación entre dos variables, siendo una representación que nos aporte una primera impresión acerca del tipo de relación que mantienen las variables.
- ✓ Coeficiente de correlación de Pearson que nos dará la medida de intensidad de la relación lineal entre dos variables, este índice se calcula en función de la covarianza de las dos variables y de la desviación típica de cada una de las variables tal que:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y},$$

En el que:

- σ_{XY} es la **covarianza** de (X, Y)
- σ_X es la **desviación típica** de la variable X
- σ_Y es la **desviación típica** de la variable Y

Este Coeficiente de correlación puede asumir valores comprendidos entre -1 y +1, en función del valor de este índice obtendremos los siguientes tipos de correlación:

Tipo de Correlación	σ
Correlación positiva o directa perfecta.	1
Correlación positiva	Mayor de 0
Correlación débil	Próxima a 0
Correlación negativa.	Menor de 1
Correlación negativa o indirecta perfecta	-1

Tabla 05. Tipos de Correlación en función del valor σ

- ✓ Coeficiente de determinación R^2 . Este es un coeficiente estadístico que mide la bondad del ajuste del modelo de regresión. Este coeficiente determina el porcentaje en tanto por 1 de la variación total de la variable dependiente (Y), que es explicado por el modelo de regresión.

Para calcular este coeficiente solamente tenemos que elevar al cuadrado el coeficiente de correlación múltiple o coeficiente de Pearson, estado su rango siempre entre 0 y 1, de modo que cuanto más próximo sea R^2 a 1, indicará mejor bondad de ajuste del modelo de regresión a la distribución conjunta de las variables.

En función de los valores del coeficiente de determinación se pueden realizar las siguientes conclusiones acerca de la bondad del ajuste.

Bondad del ajuste	σ^2
Correlación positiva o directa perfecta.	Mayor de 0,85
Correlación positiva	0,5 – 0,85
Correlación débil	0,4 – 0,5
Correlación negativa.	0,3 – 0,4
Muy malo	Menor de 0,3

Tabla 06. Bondad del ajuste en función del valor σ^2

Análisis de regresión: Este análisis es un procedimiento estadístico que estudia la relación funcional entre variables, consiste en obtener una ecuación que se pueda utilizar para predecir el valor de una variable dependiente teniendo en cuenta un valor asignado a otra variable independiente, es decir, realiza la predicción a partir de una función que cuantifica la relación entre variables, o describe estadísticamente la asociación entre variables en un estudio.

La función que cuantifica esta relación lineal es una recta de regresión que se expresa como:

$$Y = a + bx$$

Y: Valor pronosticado de la variable Y para un valor seleccionado de la variable X.

X: Variable independiente o predictor.

a: Es el valor de Y en la intersección de la recta con dicho eje, o dicho de otro modo es el valor de Y cuando X=0.

b: Pendiente de la recta.

Con esta función se estimará los valores de una variable dependiente (Y), a partir de una variable independiente (X).

Para calcular esta función lineal partimos de la definición de la ecuación de regresión, siendo esta:

$$y = \bar{y} + \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} (x - \bar{x})$$

Esta expresión se calcula sabiendo que:

$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$	Corresponde a la media de la variable independiente (Variable X).
$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$	Corresponde a la media de la variable dependiente (Variable Y).
$\sigma_x^2 = \frac{\sum (x_i)^2}{N} - (\bar{x})^2$	Varianza de la variable dependiente (Variable X).
$\sigma_{xy} = \frac{\sum x_i \cdot y_i}{N} - \bar{x} \cdot \bar{y}$	Covarianza variables dependientes e independiente (Variables X, Y).

06.06-RESULTADOS ANALISIS ESTADÍSTICO.

Los resultados obtenidos son a partir de dos análisis estadísticos diferentes, estos análisis se realizan para cada uno de los dos escenarios planteados inicialmente., siendo los análisis que se realizan:

- ✓ Análisis de correlación.
 - Gráfico de dispersión.
 - Coeficiente de Pearson.
 - Coeficiente de determinación R^2
- ✓ Análisis de regresión.

Cada escenario lo analizaremos de manera individual, obtendremos para el escenario 1, un análisis de correlación y otro de regresión, y para el escenario dos también obtendremos un análisis de correlación y de regresión

06.06.01-Análisis de correlación:

Diagrama de dispersión:

A continuación mostramos los gráficos de los diferentes diagramas de dispersión en cada uno de los dos escenarios:

Escenario 1: Valores de los índices de vegetación. Figura 25.

Escenario 2: Valores de Clusterizacion de los índices de vegetación. Figura 26.

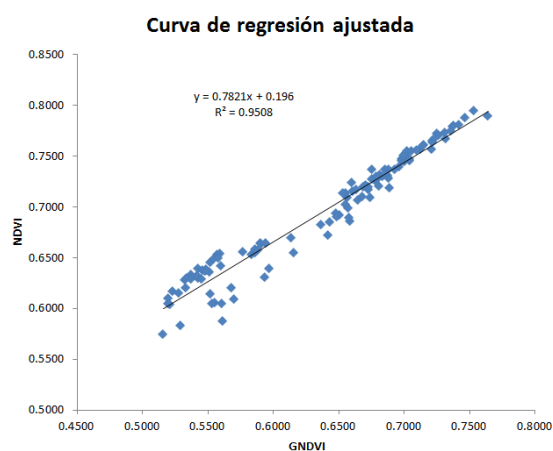
En estos gráficos hemos colocado en el eje de ordenadas el índice NDVI y en el eje de abscisas los índices (GNDVI, RVI, RG, GVI, NGRDI).

Dichos diagramas nos muestran la relación entre el índice NDVI con el resto de índices (GNDVI, RVI, RG, GVI, NGRDI). Siendo estos gráficos, la forma más directa e intuitiva de formarnos una primera impresión sobre el tipo de relación existente entre dos variables.

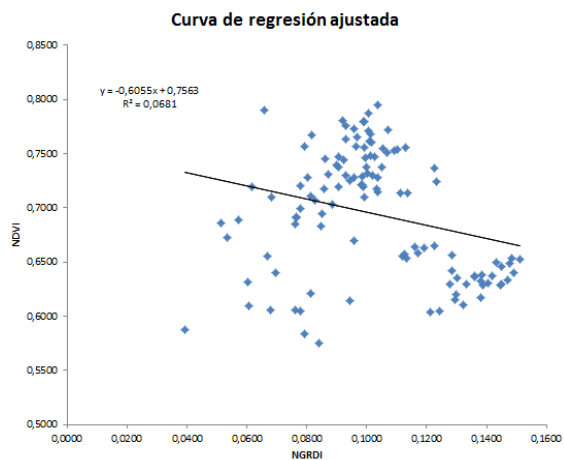
Además estos diagramas pueden utilizarse como una forma de cuantificar el grado de relación lineal existente entre dos variables, bastando con observar el grado en el que la nube de puntos se ajusta a una línea recta.

Escenario 1

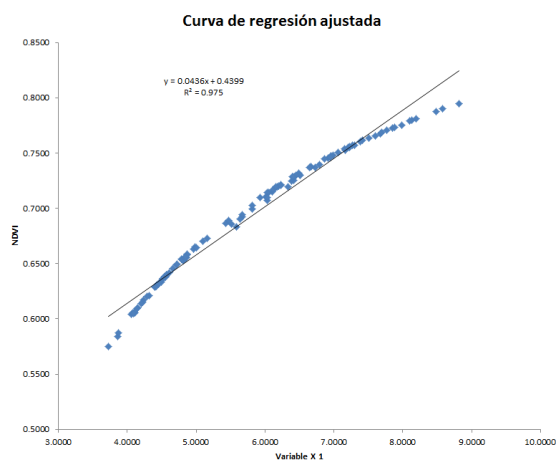
NDVI-GNDVI:



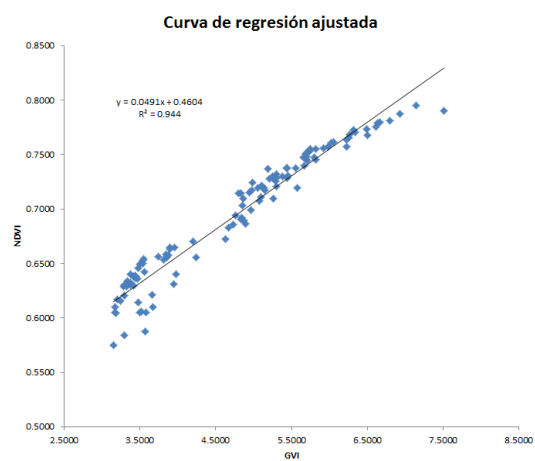
NDVI-NGRD:



NDVI-RVI:



NDVI-GVI:



NDVI-RG:

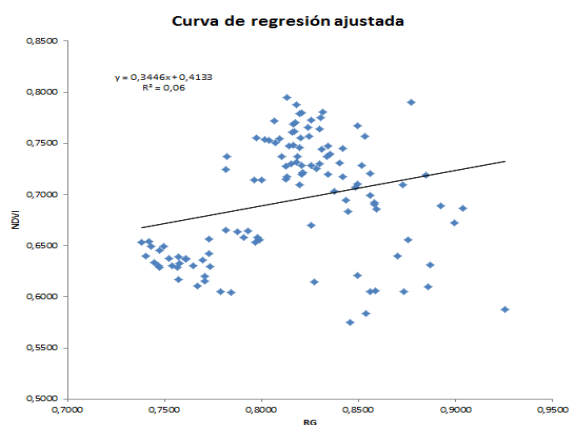


Figura 25. Curvas de regresión Escenario 1

Escenario 2

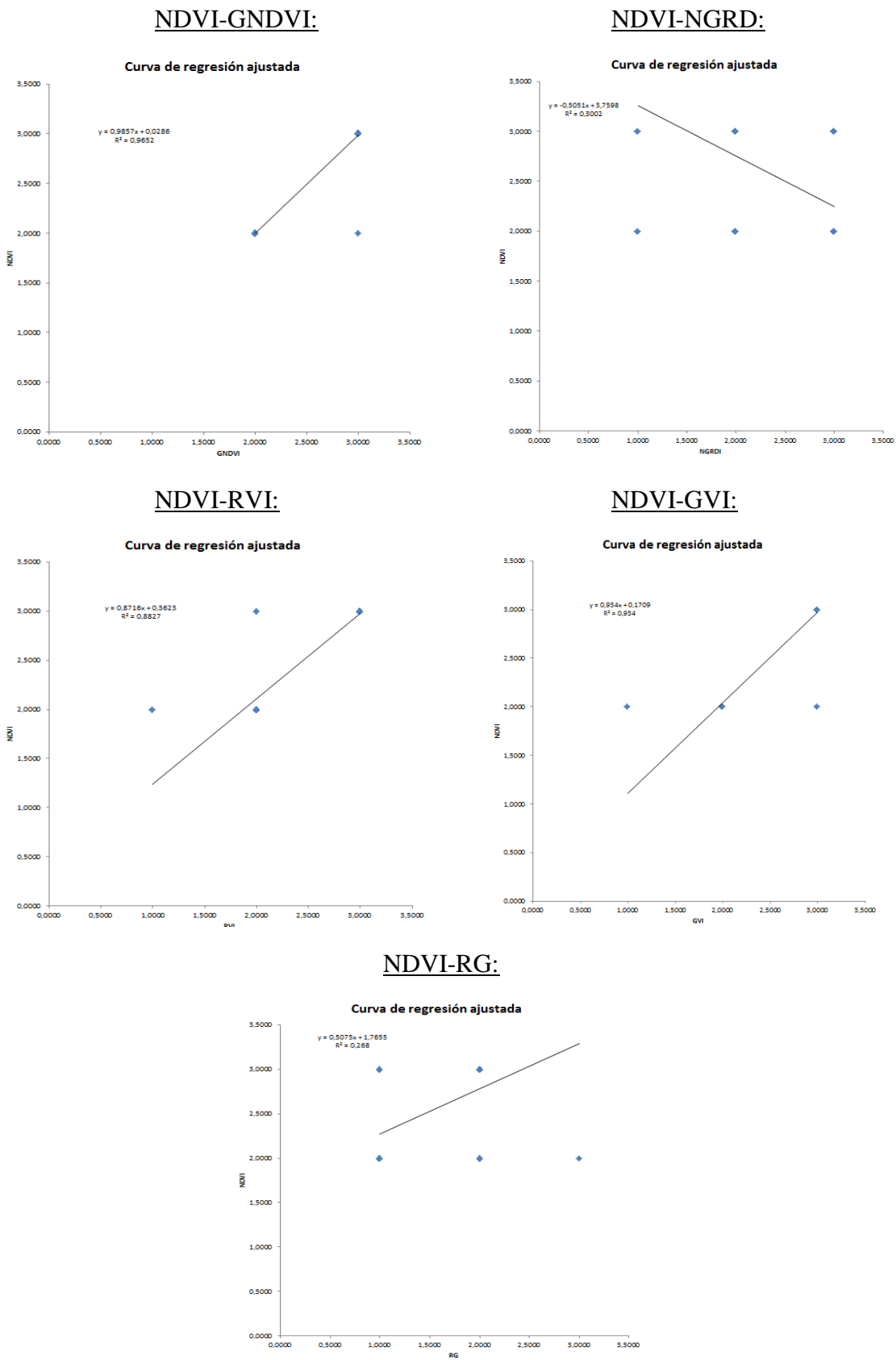


Figura 26. Curvas de regresión Escenario 2

De los resultados obtenidos podemos observar que hay dos diagramas NDVI-RG y NDVI-NGRD en los dos escenarios en los que no existe ninguna pauta de relación, quedando esto reflejado en una nube de puntos bastante dispersa sobre dicho gráfico, por otro lado los gráficos NDVI-GNDVI, NDVI-RVI y NDVI-GVI para el escenario 1 tienen una relación positiva y directa, teniendo el NDVI-RVI una variación no tan lineal y dibujando la nube de puntos un arco.

Coeficiente de correlación múltiple (Pearson) / coeficiente de determinación R^2 .

Los resultados obtenidos que nos dan los coeficientes de correlación de Pearson y determinación R^2 a partir de relacionar NDVI con (GNDVI, NGRDI, RVI, GVI, RG), son los que en la siguiente tabla se muestran, en la primera tabla tenemos valores sobre índices de vegetación (Escenario 1), y en la segunda tabla sobre valores de clusterización (Escenario 2).

Escenario 1

Estadísticas de la regresión	NDVI-GNDVI	NDVI-NGRDI	NDVI-RVI	NDVI-GVI	NDVI-RG
Coeficiente de correlación múltiple	0,975107635	0,261051068	0,987401323	0,971618049	0,245036419
Coeficiente de determinación R^2	0,950834900	0,068147660	0,974961373	0,944041633	0,060042847
Observaciones	117	117	117	117	117

Escenario 2

Estadísticas de la regresión	NDVI-GNDVI	NDVI-NGRDI	NDVI-RVI	NDVI-GVI	NDVI-RG
Coeficiente de correlación múltiple	0,982435021	0,547861088	0,939507740	0,966442007	0,517710542
Coeficiente de determinación R^2	0,965178571	0,300151772	0,882674794	0,934010152	0,268024206
Observaciones	117	117	117	117	117

Tabla 07. Coeficientes de correlación y determinación

El coeficiente de correlación múltiple, lo primero que nos va a indicar es la poca fuerza existente, entre la relación de los índices (RG, NGRDI) con el NDVI, ya que los valores de la correlación lineal de Pearson están por debajo de 0,55 en el escenario 2, y menor de 0,27 en el escenario 1.

Por otro lado nos indicará que existe una correlación directa y bastante fuerte (Valores > 0,90) entre los índices GNDVI, RVI y GVI respecto al NDVI, dándose esta correlación en los dos escenarios.

El coeficiente de determinación R^2 nos indica la alta bondad que tienen los ajustes de los modelos de regresión calculados para la relación entre los índices NDVI, y los índices GNDVI, RVI y GVI, tanto en el escenario 1 como en el escenario 2, también este coeficiente nos indica que los modelos de regresión calculados que relacionan los índices RG, y NGRDI con el índice NDVI son muy malos sobre todo en el escenario 1 (valores inferiores a 0,1), siendo algo mejores en el escenario 2.

06.06.02-Análisis de regresión:

Con este análisis pretendemos estimar los valores de una variable dependiente en función de los valores de otras independientes, es decir, los valores de NDVI en función de los índices de vegetación (GNDVI, NGRDI, RVI, GVI, RG), los cuales van a ser válidos, solamente en aquellas cuya correlación sea fuerte, desestimando por ello las ecuaciones de regresión de los índices NGRDI y RG.

Los valores a partir de los cuales se calculan las ecuaciones de regresión son los que en las siguientes tabla se indican (Tabla 08, Tabla 09), siendo necesarios calcular tanto la media de cada uno de las variables como la varianza también de ambas variables y la covarianza con que se relacionan dichas variables.

Escenario 1 Valores de índices

Var.Dep (Y)	Var.Indp (X)	Covarianza	Media (Y)	Media (X)	Varianza (Y)	Varianza (X)
Index NDVI	Index GNDVI	0.0040	0.6943	0.6370	0.0033	0.0051
Index NDVI	Index NGRDI	-0.0004	0.6943	0.1025	0.0033	0.0006
Index NDVI	Index RVI	0.0734	0.6943	5.8327	0.0033	1.6966
Index NDVI	Index GVI	0.0630	0.6943	4.7599	0.0033	1.2942
Index NDVI	Index RG	0.0006	0.6943	0.8154	0.0033	0.0017

Tabla 08. Coeficientes de correlación y determinación

Escenario 2 Valores de Clúster.

Var.Dep (Y)	Var.Indp (X)	Covarianza	Media (Y)	Media (X)	Varianza (Y)	Varianza (X)
NDVI Clúster	GNDVI Clúster	0.2369	2.5897	2.5983	0.2440	0.2424
NDVI Clúster	NGRDI Clúster	-0.1384	2.5897	2.3162	0.2440	0.2871
NDVI Clúster	RVI Clúster	0.2450	2.5897	2.5556	0.2440	0.2835
NDVI Clúster	GVI Clúster	0.2419	2.5897	2.5897	0.2440	0.2613
NDVI Clúster	RG Clúster	0.1278	2.5897	1.6239	0.2440	0.2539

Tabla 09. Coeficientes de correlación y determinación

Las ecuaciones de regresión que nos permitirán obtener valores de NDVI a partir de otros índices (GNDVI,NGRDI,RVI,GVI,RG), son los que en la siguiente tabla se muestran.

En la tabla 10 tenemos los resultados de las funciones para el escenario 1, y en la tabla 11 los resultados de las funciones para el escenario 2. Que ha sido calculados a partir de la expresión:

$$y = \bar{y} + \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2}(x - \bar{x})$$

Escenario 1 Valores de índices

Var.Dep (Y)	Var.Indp (X)	Ecuación de Regresión
Index NDVI	Index GNDVI	$Y=0.6943+(0.0040/(0.0051)^2*(X-0.637)$
Index NDVI	Index NGRDI	$Y=0.6943+(-0.0004/(0.0006)^2*(X-0.1025)$
Index NDVI	Index RVI	$Y=0.6943+(0.0734/(1.6966)^2*(X-5.8327)$
Index NDVI	Index GVI	$Y=0.6943+(0.0630/(1.2942)^2*(X-4.7599)$
Index NDVI	Index RG	$Y=0.6943+(0.0006/(0.0017)^2*(X-0.8154)$

Tabla 10. Regresión de Índices de vegetación

Escenario 2 Valores de Clúster

Var.Dep (Y)	Var.Indp (X)	Ecuación de Regresión
NDVI Clúster	GNDVI Clúster	$Y=2.5897+(0.2369/(0.2424)^2*(X-2.5983)$
NDVI Clúster	NGRDI Clúster	$Y=2.5897+(-0.1384/(0.2871)^2*(X-2.3162)$
NDVI Clúster	RVI Clúster	$Y=2.5897+(0.2450/(0.2835)^2*(X-2.5556)$
NDVI Clúster	GVI Clúster	$Y=2.5897+(0.2419/(0.2613)^2*(X-2.5897)$
NDVI Clúster	RG Clúster	$Y=2.5897+(0.1278/(0.2539)^2*(X-1.6232)$

Tabla 11. Regresión clúster Índices de vegetación

Simplificando las expresiones anteriores, y descartando aquellas que el modelo de regresión calculado indica que no es conveniente para poder representar las variables implicadas, obtenemos las siguientes funciones lineales (Tabla 12, Tabla 13), que modelan las relaciones entre dichas variables.

Escenario 1 Valores de índices

Var.Dep (Y)	Var.Indp (X)	Ecuación de Regresión
Index NDVI	Index GNDVI	$Y=0,78X-0,19$
Index NDVI	Index RVI	$Y=0,04X+0,44$
Index NDVI	Index GVI	$Y=0,05X+0,46$

Tabla 12. Regresión de Índices de vegetación simplificado

Escenario 2 Valores de Clúster

Var.Dep (Y)	Var.Indp (X)	Ecuación de Regresión
NDVI Clúster	GNDVI Clúster	$Y=0,98X+0,03$
NDVI Clúster	RVI Clúster	$Y=0,87X+0,38$
NDVI Clúster	GVI Clúster	$Y=0,93X+0,17$

Tabla 13. Regresión Cluster de vegetación simplificado

Estas expresiones serán las funciones que nos permitirán predecir valores de índices de vegetación en el caso de que dispongamos de otros índices tales como GNDVI, RVI y GVI, ya que son aquellos en los que hemos obtenido un coeficiente determinación R^2 bueno indicándonos que el modelo de regresión se ajusta de una manera óptima

Sería conveniente y muy interesante poder realizar estos estudios utilizando otros índices, sobre todo en aquellos en los que se trabaje con la banda azul del espectro visible, ya que en este proyecto solo hemos trabajado dentro del espectro visible con índices que tienen la banda verde y roja.

07. CONCLUSIONES:

A continuación pasamos a detallar una serie de puntos, con las conclusiones que hemos obtenido durante el desarrollo de este proyecto, las cuales pretenden dar respuesta a los objetivos iniciales de este.

- La aplicación de la tecnología (UAS/RPAS) implica un aumento de productividad, así como reducción drástica de tiempos y coste. Los UAS/ RPAS junto con las cámaras multispectrales son una herramienta de gran utilidad para obtención de datos relacionados con agricultura de precisión, en zonas o áreas reducidas, siendo muy útiles para testear determinadas áreas de grandes extensiones de terreno y extrapolar esta información al resto de la superficie. Siendo necesaria la teledetección para estudiar grandes explotaciones agrarias.
- Los UAS/RPAS suponen una alternativa a la cartografía tradicional, mejorando notablemente los rendimientos y permitiendo accesibilidad a zonas peligrosas y complejas. Además esta tecnología de los UAS/RPAS, nos va a ser de gran utilidad para cartografiar diferentes variables agronómicas.
- Los UAS/RPAS son una herramienta más precisa y económica que la fotogrametría convencional, debido a su facilidad de planificación de vuelo y rápido registro de imágenes. Obteniéndose precisiones y resoluciones mucho mayores que a partir de fotogrametría convencional.
- Los UAS/RPAS tienen el hándicap de la poca autonomía de vuelo, lo que conlleva la menor cantidad de superficie sobre la que se puede obtener datos o imágenes, siendo poco útiles cuando se requieren imágenes de grandes explotaciones agrarias (viñedos, olivares, triguales por encima trescientas cuatrocientas hectáreas).
- Los mapas de índices de vegetación nos indican la semejanza entre los índices de vegetación NDVI y GNDVI, siendo estos prácticamente iguales. Estos dos índices NDVI y GNDVI pueden ser punto de partida para el mapeo del estado vegetativo de diferentes cultivos. Por el contrario los índices RG y NGRDI no son útiles para la obtención de mapeo de vigorosidad de cultivos.
- En el caso del índice RG tenemos que los datos son totalmente contrarios al índice NDVI, debido a que en la expresión matemática que lo define, la banda que nos aporta información acerca de la vigorosidad de la vegetación, se encuentra en el denominador, y la banda del rojo que es la que nos indica falta de vigorosidad se encuentra en el numerador, por lo tanto al presentar la vegetación mas vigorosidad, menor será el valor de este índice.
- Los mapas de clusterización o agrupación de índices nos indicará además la semejanza entre los mapas de los índices NDVI, GNDVI, RVI, GV y por tanto su similitud.
- Mediante la realización de un análisis estadístico de correlación y de regresión hemos podido comprobar la similitud entre una serie de índices como son NDVI, GNDVI, RVI y GVI.
- Queda demostrado que para obtener datos de vigorosidad vegetativa, es fundamental trabajar con el infrarrojo cercano, no aportando excesiva información el trabajar solo con la banda roja o verde. Además las combinaciones de la banda del rojo y la del

verde entre si no aportan ningún tipo de información que nos sirva para determinar el estado vegetativo de los cultivos (ver los índices NGRD, RG).

- Las cámaras o sensores con los que actualmente se está empezando a trabajar en agricultura de precisión utilizando los UAS/RPAS como plataforma de vuelo, tienen una resolución espectral centrada en la región del visible y en la banda del infrarrojo próximo, a partir de los cuales se obtienen la mayoría de los índices de vegetación.

- A partir de datos obtenidos sobre UAS/RPAS con las cámaras multiespectrales, podemos obtener información acerca de los cultivos en aspectos tan variados como:

1. Tratamiento localizado de herbicidas:
2. Stress nutricional y usos de fertilizantes.
3. Detección de enfermedades y plagas en cultivos.
4. Supervisión de áreas fumigadas.

- Queda demostrado la utilidad de los sistemas de información geográfica para tratar imágenes aéreas procedentes de UAS/RPAS y su aplicación para realizar estudios y mapeos en agricultura de precisión.

- Los UAS/RPAS suponen una revolución en el mercado para su uso civil, lo que conllevará si se regula su uso en el espacio aéreo de forma favorable a una nueva forma de entender y concebir muchos de los servicios, tal como los conocemos en la actualidad (entrega paquetería, servicios entrega comida a domicilio...). Una de las aplicaciones con más potencial, es en la agricultura de precisión y la monitorización de los campos. Este nuevo sistema permitirá aumentar los beneficios económicos de los agricultores, evitará la aplicación innecesaria de compuestos fitosanitarios (herbicidas y pesticidas) y reducirá el consumo de recursos hídricos en los campos.

- La flexibilidad que nos genera los UAS/RPAS a la hora de poder realizar el vuelo justo en el momento que el agricultor lo necesite, y la flexibilidad en el hecho de que el flujo de trabajo completo pueda ser llevado a cabo en 1 o 2 días, permite que la detección y mapeo sea más veloz que otros métodos utilizados hasta ahora. Pudiéndose estudiar la necesidad de fertilizantes y nutrientes en el momento más conveniente para sus cultivos. Sin necesidad de esperas que provoquen que el tratamiento herbicida se acabe aplicando en un momento poco adecuado.

- Mediante el análisis de las imágenes aéreas de muy alta resolución espacial obtenida con UAS/RPAS equipados con sensores de diferentes rangos espectrales, se pueden generar mapas georreferenciados de vigorosidad, humedad, temperatura y actualmente hay tecnologías y equipos agrícolas que pueden realizar tratamientos fitosanitarios o programas de riego en base a los mapas que definen las zonas a las que hay que prestar una especial atención.

Referencias Bibliográficas

- Barreiro Elorza, Pilar; Valero Ubierna, Constatino; Tierras de Castilla y León Agricultura (2014)
- Casterad, M.; López, R. y Acevedo, A. (2008). *Uso de técnicas SIG y teledetección en el seguimiento del cultivo de viña*. Centro de Investigación y tecnología agroalimentaria de Aragón.
- Catanzarite Torres, Tainy; González Fernández, Ana Belén; Benavente Cobo, Francisco Julián; Rodríguez Pérez, Jose Ramón; Grupo de Investigación GI202: Geomática e Ingeniería Cartográfica (Geoinca). Universidad de León “SIG para el seguimiento vitícola y diferenciación de lotes de vendimia en la D.O. Bierzo (León-España) “(2013).
- García Domínguez, Beatriz. (2011) “Localización óptima de paneles solares en tejados mediante UAV”. Universidad Complutense de Madrid.
- Instituto Nacional de Desarrollo Agropecuario de Chile. (2013). *Resultados y lecciones en agricultura de precisión en viñedos, 2008*. Fundación para la innovación agraria. http://www.indap.gob.cl/sites/default/files/agricultura_de_precision_en_vinedos.pdf.
- Kemerer, A.; Di Bella, C.; Melchiori, R.; Benench, A.; Alvarez, R.(2007). *Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en campos de maíz*. Congreso de teledetección: hacía mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Asociación Española Teledetección.
- López-Granados, Francisca. Instituto de Agricultura Sostenible-IAS/CSIC (2011) “USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) PARA LA EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRARIA”.
- López-Granados, Francisca; Gómez-Candón, A.; De Castro-Magias, A. I.; Jurado-Expósito, M.; Torres-Sánchez, J.; y Peña-Barragán, J.M. (2006). Instituto de Agricultura Sostenible-IAS/CSIC “DISCRIMINACIÓN DE MALAS HIERBAS EN CULTIVOS: DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE A LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS “.
- Martínez-Casasnovas, J.A.; Agelet-Fernández, J.; Arnó, J. y Ramos, M.C. (2012). *Analysis of vineyard differential management zones and relation to vine development, grape maturity and quality*. Spanish Journal of Agricultural Research 10: 326-337.
- Peña-Barragán, J.M.; Kelly, M.; De-Castro Magias, A.I. and López-Granados, Francisca (2012). Object-based approach for maize crop row characterization in UAV images for Site-Specific Weed Management. *Proceedings of the Geographic Object-Based Image Analysis Congress*, Río de Janeiro (Brasil) in press.
- Peña-Barragán, J.M.; López-Granados, F.; Jurado-Expósito, M; and García-Torres, L; (2007). Mapping *Ridolfia segetum* patches in sunflower crop using remote sensing. *Weed Research*, 47: 164-172.

- Peña-Barragán, J.M.; López-Granados F.; García-Torres L.; Jurado-Expósito M.; Sánchez De La Orden M. and García-Ferrer A. (2008). Discriminating cropping systems and agri-environmental measures by remote sensing. *Agronomy for Sustainable Development*, 28: 355- 362
- Peña-Barragan, J.M.; López-Granados, L.; Jurado-Expósito, M. and García-Torres, L. (2010). Sunflower yield related to multitemporal aerial photography, land elevation and weed infestation. *Precision Agriculture*, 11: 568-585.
- Peña-Barragan, J.M.; Ngugi, M.K.; Plant, R.E.; Six, J. (2011). Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sensing and Environment*, 115: 1301–1316.
- Peña-Barragan, J.M.; Torres-Sánchez, J.; De Castro-Megías, A.I. and López-Granados, F. 2013. Generating weed maps in early-season maize fields by using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and object-based image analysis. *PLoS One*, e77151.
- Stanley Best (INIA), Agricultura de precisión. Accesibilidad al usuario INIA Chile - Instituto de Investigaciones Agropecuarias (2012)
- Subira Biosca, Carmen. “Zonificación de parcelas frutícolas a partir de índices de vegetación de imágenes del satélite worldview-2 con fines de agricultura de precisión”. Universidad Complutense de Madrid. (2011)
- Torres-Sánchez, J.; Peña, J.M.; De Castro-Megías, Ana Isabel. and López-Granados, F. (2013). Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management. *PLoS ONE* 8, e58210.
- Torres-Sánchez J.; Peña-Barragán, J.M.; De Castro-Megías, A.I.; F. López-Granados *Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)* “Seguimiento multi-temporal de trigo para la detección de malas hierbas en imágenes tomadas desde un vehículo aéreo no tripulado (UAV)” XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA, Torrejón de Ardoz (Madrid). (22-24 octubre, 2013).
- Torres-Sánchez, J.; Peña, J.M.; de Castro-Megías, A.I. and López-Granados, F. (2013). Multi-temporal mapping of vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. Submitted.
- Yuste Martín, R.; Vargas Velasco, N.; y Moya Hernández, J.; Departamento de Vehículos Aéreos no Tripulados. Zumain Ingenieros S.L. “Teledetección ambiental de alta resolución mediante aplicación de vehículos aéreos no tripulados”. (Junio 2013)

ENLACES DE INTERÉS

- Asociación para el Sistema Internacional de Aparatos No Tripulados (AUVSI).
- Agencia Española de Seguridad Aérea (AESA).
- Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales.
- Proyecto Fieldcopter-VIII Programa Marco de la Comisión Europea.
- Instituto Español de Estudios Estratégicos.
- Navegación aérea. Ministerio de Fomento.
- Instituto de Agricultura Sostenible de Córdoba • Centro Avanzado de tecnologías aeroespaciales-CATEC.
- www.AereoConsult.com

ANEJOS:

Listado de Valores Ponderados de los diferentes índices.

OBJECTID	NVDI	GNDWI	NDSDI	RVI	GVI	ND
1	0,6982090	0,5627520	0,1177360	4,5379600	3,5740600	0,7893310
2	0,6300900	0,5463520	0,1276980	4,4087200	3,4087000	0,7735240
3	0,6133250	0,5510280	0,0928157	4,1733000	3,4635700	0,8301350
4	0,5885630	0,4928120	0,1348710	3,8610100	2,9433100	0,7623150
5	0,6403220	0,5558250	0,1316150	4,5605300	3,4996900	0,7573860
6	0,6528090	0,5441470	0,1585170	4,7604200	3,3873800	0,7115720
7	0,6562890	0,5598130	0,1525070	4,8188400	3,5435200	0,7353470
8	0,6180650	0,5286860	0,1327600	4,2364900	3,2434500	0,7555990
9	0,6662750	0,5676320	0,1585410	4,9929600	3,6256900	0,7261610
10	0,6494020	0,5512830	0,1528340	4,7945400	3,4571500	0,7348550
11	0,6317800	0,5556510	0,1173100	4,4315300	3,5009700	0,7900130
12	0,6299640	0,5367780	0,1407970	4,4948800	3,3175900	0,7531610
13	0,6098160	0,5132750	0,1418560	4,1257900	3,1067000	0,7515340
14	0,6317940	0,5490930	0,1266310	4,4317400	3,4355000	0,7752040
15	0,7309780	0,7015250	0,0604529	5,4343200	5,7007100	0,8859870
16	0,7565970	0,6889800	0,1412440	7,2168100	5,4304600	0,7524730
17	0,6454040	0,5467290	0,1524790	4,6402200	3,4123700	0,7353900
18	0,5824600	0,4938580	0,1243800	3,7899600	2,9514600	0,7787580
19	0,6458530	0,5554580	0,1409660	4,6473700	3,4990100	0,7529010
20	0,5970080	0,4975960	0,1414260	3,9628800	2,9808600	0,7521950
21	0,6317540	0,5330580	0,1488100	4,4311500	3,2831800	0,7409330
22	0,6732540	0,6361360	0,0649233	5,1209600	4,4965600	0,8780700
23	0,7331840	0,7139920	0,0402742	6,4957900	5,9928200	0,9225700
24	0,5855730	0,5081980	0,0805182	3,6037700	3,0666700	0,8509640
25	0,7194990	0,6658860	0,1029240	5,1301000	4,9859900	0,8133620
26	0,7248920	0,6589060	0,1263210	5,2698700	4,8634900	0,7756920
27	0,7310720	0,6778920	0,1054310	5,4369400	5,2090900	0,8092490
28	0,7342170	0,6889410	0,0953857	5,5249500	5,3885700	0,8258410
29	0,7065050	0,6571480	0,0922316	5,8144200	4,8334200	0,8312810
30	0,6176570	0,5670150	0,0779373	4,2309000	3,6190900	0,8553960
31	0,6638510	0,6171770	0,0790705	4,9497500	4,2243500	0,8534470
32	0,7611890	0,7055400	0,1202050	7,3748300	5,7921000	0,7853880
33	0,6416840	0,5718690	0,1102520	4,5819600	3,6734700	0,8013930
34	0,6214430	0,5426340	0,1189060	4,2832200	3,3728600	0,7874600
35	0,6457200	0,5600880	0,1341480	4,6482500	3,5463600	0,7634380
36	0,6474390	0,5515710	0,1491200	4,6727800	3,4600200	0,7404620
37	0,6274720	0,6025240	0,0401139	4,3687200	4,0317400	0,9228660
38	0,5805980	0,5336560	0,0680158	3,7687000	3,2886800	0,8726310
39	0,5893770	0,5379130	0,0753526	3,8706400	3,3281900	0,8598550
40	0,7928580	0,7799950	0,0937124	8,6582300	8,0906900	0,9947740
41	0,7647410	0,7232950	0,0927486	7,5012800	6,2279200	0,8302470
42	0,7380050	0,6872440	0,1030030	6,6337200	5,3947500	0,8132320
43	0,6337920	0,6031680	0,0495768	4,4618800	4,0399100	0,9055300
44	0,6992230	0,6433920	0,1014870	5,6494400	4,6084900	0,8157270
45	0,7021200	0,6518440	0,0927043	5,7141200	4,7445500	0,8303210
46	0,7327220	0,6785890	0,1076670	6,4828500	5,2225600	0,8055970
47	0,7467270	0,7108030	0,0765611	6,8966200	5,9156900	0,8577670
48	0,7936970	0,7464080	0,1160250	8,6944600	6,3866700	0,7920750
49	0,7551540	0,7043470	0,1085370	7,1684100	5,7646800	0,8041790
50	0,7267160	0,6862750	0,0806760	6,3183900	5,3750100	0,8506930
51	0,6241210	0,5355320	0,1139640	4,3208600	3,3060000	0,7651260
52	0,6350180	0,5375410	0,1479940	4,4797200	3,3247100	0,7421690
53	0,6716760	0,5643170	0,1728920	5,0915400	3,5904900	0,7051870
54	0,6569810	0,5797760	0,1247050	4,8305800	3,7593700	0,7782450
55	0,6423670	0,5954040	0,0760504	4,5923300	3,9432000	0,8984490
56	0,6438060	0,5963670	0,0770053	4,6149200	3,9549900	0,8570010
57	0,5918880	0,5550860	0,0547797	3,9003800	3,4952500	0,8961310
58	0,7367330	0,6841380	0,1065440	6,5968600	5,3318900	0,8082460
59	0,7025410	0,6447710	0,1056080	5,7236100	4,6301700	0,8089590

OBJECTID	NVDI	GNDWI	NRDI	RVI	GVI	RG
60	0,7793240	0,7407540	0,0912196	8,0626700	6,7146800	0,8328120
61	0,7337890	0,6994940	0,0704614	6,5128400	5,6554500	0,8683530
62	0,7282480	0,6768420	0,1013760	6,3566800	5,1880300	0,8159100
63	0,7495190	0,7012500	0,1017460	6,9846200	5,6945700	0,8153010
64	0,7690950	0,7007450	0,1482440	7,6615600	5,5832700	0,7417900
65	0,7486680	0,6994260	0,1033710	6,9576000	5,6539300	0,8126270
66	0,7418740	0,6882780	0,1095170	6,7481500	5,4159700	0,8025860
67	0,7401890	0,6945260	0,0939778	6,6979100	5,5472000	0,8281990
68	0,6395950	0,5785980	0,0968305	4,5493100	3,7460600	0,8234360
69	0,6766320	0,6010530	0,1273850	5,1849100	4,0132000	0,7740160
70	0,6537940	0,5775710	0,1224690	4,7769100	3,7345300	0,7817870
71	0,6411460	0,5805700	0,0964948	4,5739000	3,7683700	0,8239940
72	0,6277020	0,5878840	0,0627828	4,3648300	3,8530000	0,8837380
73	0,5408750	0,4977310	0,0590382	3,3561200	2,9819300	0,8885060
74	0,7669190	0,7389450	0,0645614	7,5807000	6,6612200	0,8787080
75	0,7498090	0,6734210	0,1542990	6,9938800	5,1240900	0,7326530
76	0,7623440	0,7268570	0,0793507	7,4120000	6,3271800	0,8529660
77	0,7547430	0,7246790	0,0663578	7,1547000	6,2640400	0,8755430
78	0,7252900	0,6883260	0,0738143	6,2804000	5,4169700	0,8625190
79	0,7663260	0,7245720	0,0938840	7,5589200	6,2614200	0,8283470
80	0,7504120	0,7175910	0,0711173	7,0132100	6,0819200	0,8672090
81	0,7552990	0,7161460	0,0852685	7,1730200	6,0458700	0,8428620
82	0,7632780	0,7231990	0,0894612	7,4487200	6,2254200	0,8357700
83	0,7791580	0,7425050	0,0869661	8,0562600	6,7671300	0,8399840
84	0,8030340	0,7582950	0,1144030	9,1540400	7,1745600	0,7946830
85	0,6573130	0,5835920	0,1196000	4,8362300	3,8029900	0,7863530
86	0,6863380	0,6156630	0,1223920	5,3762900	4,2037600	0,7819080
87	0,6722970	0,5852290	0,1435450	5,1030800	3,8219400	0,7488470
88	0,5699090	0,5238620	0,0679072	3,6501100	3,1916600	0,8744020
89	0,6032950	0,5772230	0,0400014	4,0415300	3,7306300	0,9230740
90	0,7374590	0,6959960	0,0851872	6,6178600	5,5788500	0,8430000
91	0,7748870	0,7444940	0,0718325	7,8644200	6,8276100	0,8659630
92	0,7014680	0,6538680	0,0879318	5,6994600	4,7781400	0,8383510
93	0,8248220	0,7754300	0,1345780	10,4170000	7,9457400	0,7627700
94	0,7685070	0,7179690	0,1127470	7,6395600	6,0914300	0,7973530
95	0,7668830	0,7252930	0,0937179	7,5794000	6,2804600	0,8286250
96	0,7647720	0,7206370	0,0983243	7,5024000	6,1591400	0,8209560
97	0,7817740	0,7488970	0,0793123	8,1648200	6,9648500	0,8530320
98	0,7259900	0,6925600	0,0872344	6,2990000	5,5053400	0,8740090
99	0,7789310	0,7311950	0,1108990	8,0469600	6,4403300	0,8003430
100	0,7714280	0,7129630	0,1298220	7,7499900	5,9677500	0,7700330
101	0,7313340	0,6707370	0,1189410	6,4441800	5,0741800	0,7874050
102	0,7453730	0,7103680	0,0743961	6,8546100	5,9053200	0,8615110
103	0,7410490	0,6881460	0,1079530	6,7234600	5,4132700	0,8051310
104	0,7434950	0,7066500	0,0718475	6,7971200	5,8858800	0,8659370
105	0,7539100	0,7045450	0,1052930	7,1271100	5,7692200	0,8094750
106	0,7362270	0,6874340	0,0987924	6,5822700	5,3986500	0,8201800
107	0,7610120	0,7196250	0,0914923	7,3686300	6,1338100	0,8323540
108	0,7971590	0,7569170	0,1014620	8,8599200	7,2276500	0,8157690
109	0,7654520	0,7315890	0,0769590	7,5270300	6,4512700	0,8570810
110	0,7032070	0,6474610	0,1022430	5,7387100	4,6731300	0,8143170
111	0,6632940	0,6335600	0,0512855	4,9399000	4,4579300	0,9024330
112	0,7452370	0,6885120	0,1165040	6,8504500	5,4208000	0,7913060
113	0,7365000	0,6791860	0,1146770	6,5901200	5,2341500	0,7942410
114	0,7122810	0,6367990	0,1381400	5,9512100	4,5065900	0,7572540
115	0,7285880	0,6946430	0,0687284	6,3689600	5,5497200	0,8713830
116	0,7285900	0,6728340	0,1093730	6,3689300	5,1131000	0,8028200
117	0,7159700	0,6644300	0,0983060	6,0415200	4,9600000	0,8209860

OBJECTID	NVDI	QNDVI	NRDI	RII	GVI	IGI
Media	0,6979779	0,6409895	0,1027593	5,9263803	4,8364496	0,8150065
Varianza	0,008	0,010	0,001	2,441	1,788	0,008
Desv. Tipica	0,064	0,078	0,030	1,470	1,366	0,050
Covarianza		0,005	0,000	0,092	0,077	0,000
Correl. Linear Pearson		0,96909	-0,10479	0,97622	0,95334	0,09529

Listado de Valores Ponderados de los diferentes Clúster de índices.

OBJECTID	CLUSTERL_NDVI	CLUSTERL_GNDVI	CLUSTERL_NGRDI	CLUSTERL_IRVI	CLUSTERL_GVI	CLUSTERL_RGI
1	2	2	3	2	2	1
2	2	2	3	2	1	1
3	2	2	2	2	2	2
4	2	2	3	2	1	1
5	2	2	3	2	2	1
6	2	2	3	2	1	1
7	2	2	3	2	2	1
8	2	2	3	2	1	1
9	2	2	3	2	2	1
10	2	2	3	2	2	1
11	2	2	3	2	2	1
12	2	2	3	2	1	1
13	2	2	3	2	1	1
14	2	2	3	2	2	1
15	3	3	2	3	3	2
16	3	3	3	3	3	1
17	2	2	3	2	2	1
18	2	2	3	1	1	1
19	2	2	3	2	2	1
20	2	2	3	2	1	1
21	2	2	3	2	1	1
22	2	3	2	2	2	2
23	3	3	1	3	3	3
24	2	2	2	1	1	2
25	3	3	2	3	3	2
26	3	3	3	3	3	1
27	3	3	2	3	3	2
28	3	3	2	3	3	2
29	3	3	2	3	3	2
30	2	2	2	2	2	2
31	2	2	2	2	2	2
32	3	3	3	3	3	1
33	2	2	2	2	2	1
34	2	2	3	2	1	1
35	2	2	3	2	2	1
36	2	2	3	2	2	1
37	2	2	1	2	2	3
38	2	2	2	1	1	2
39	2	2	2	2	1	2
40	3	3	1	3	3	3
41	3	3	2	3	3	2
42	3	3	2	3	3	2
43	2	2	1	2	2	3
44	3	3	2	2	2	2
45	3	3	2	2	2	2
46	3	3	2	3	3	1
47	3	3	2	3	3	2
48	3	3	3	3	3	1
49	3	3	2	3	3	1
50	3	3	2	3	3	2
51	2	2	3	2	1	1
52	2	2	3	2	1	1
53	2	2	3	2	2	1
54	2	2	3	2	2	1
55	2	2	2	2	2	2
56	2	2	2	2	2	2
57	2	2	1	2	2	2
58	3	3	2	3	3	2
59	3	3	2	2	2	2

OBJECTID	CLUSTER_L_NDVI	CLUSTER_G_NDVI	CLUSTER_NGRDI	CLUSTER_RVI	CLUSTER_GVI	CLUSTER_RG
60	3	3	2	3	3	2
61	3	3	2	3	3	2
62	3	3	2	3	3	2
63	3	3	2	3	3	2
64	3	3	3	3	3	1
65	3	3	2	3	3	2
66	3	3	2	3	3	1
67	3	3	2	3	3	2
68	2	2	2	2	2	2
69	2	2	3	2	2	1
70	2	2	3	2	2	1
71	2	2	2	2	2	2
72	2	2	2	2	2	2
73	2	2	1	1	1	2
74	3	3	2	3	3	2
75	3	3	3	3	3	1
76	3	3	2	3	3	2
77	3	3	2	3	3	2
78	3	3	2	3	3	2
79	3	3	2	3	3	2
80	3	3	2	3	3	2
81	3	3	2	3	3	2
82	3	3	2	3	3	2
83	3	3	2	3	3	2
84	3	3	3	3	3	1
85	2	2	3	2	2	1
86	3	2	3	2	2	1
87	2	2	3	2	2	1
88	2	2	2	1	1	2
89	2	2	1	2	2	3
90	3	3	2	3	3	2
91	3	3	2	3	3	2
92	3	3	2	2	2	2
93	3	3	3	3	3	1
94	3	3	3	3	3	1
95	3	3	2	3	3	2
96	3	3	2	3	3	2
97	3	3	2	3	3	2
98	3	3	2	3	3	2
99	3	3	2	3	3	1
100	3	3	3	3	3	1
101	3	3	3	3	3	1
102	3	3	2	3	3	2
103	3	3	2	3	3	1
104	3	3	2	3	3	2
105	3	3	2	3	3	2
106	3	3	2	3	3	2
107	3	3	2	3	3	2
108	3	3	2	3	3	2
109	3	3	2	3	3	2
110	3	3	2	2	2	2
111	2	3	1	2	2	3
112	3	3	3	3	3	1
113	3	3	3	3	3	1
114	3	3	3	3	2	1
115	3	3	2	3	3	2
116	3	3	2	3	3	1
117	3	3	2	3	3	2

OBJECTID	ML_mdvi_03	ML_gmdvi_0	ML_ngrdi_0	ML_rvi_03c	ML_gvi_03c	ML_rg_03d
Media	2.5811566	2.5637436	2.3076623	2.4871795	2.3760684	1.6133846
Varianza	0.300	0.299	0.195	0.388	0.573	0.361
Desv Tipica	0.435	0.494	0.594	0.562	0.728	0.585
Covarianza		0.230	-0.068	0.147	0.303	0.063
Corr Linear Pearson		0.94733	-0.23209	0.86378	0.84685	0.21278